

# GEOTERMIA A BASSA ENTALPIA

1 **Circuito chiuso**: modalità di realizzazione e prove in situ.  
Limitazioni d'uso e rischi dal punto di vista ambientale e pratico

2 **Circuito aperto**: fattibilità e potenzialità dell'acquifero. Moto delle acque sotterranee e del calore. Tipologie di installazione dal punto di vista idrogeologico. Limitazioni d'uso e rischi dal punto di vista ambientale e pratico.

Giovanni Pietro Beretta

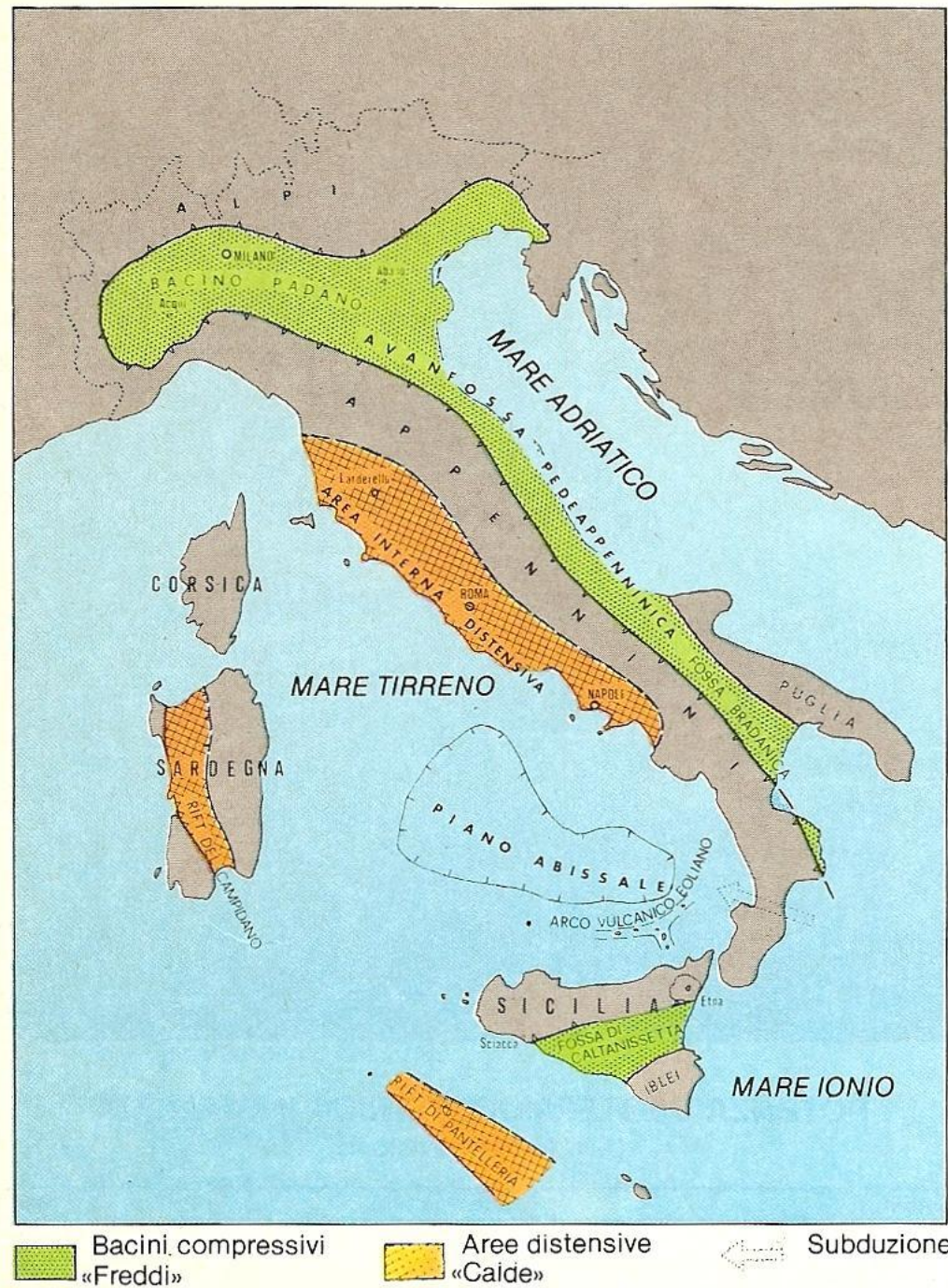
*Trento, 17 aprile 2026*

# TEMPERATURA E GEOTERMIA

Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura (°C)				
	(a)	(b)	(c)	(d)
<b>Risorse a bassa entalpia</b>	<b>&lt;90</b>	<b>&lt;125</b>	<b>&lt;100</b>	<b>≤150</b>
Risorse a media entalpia	90-150	125-225	100-200	*
Risorse ad alta entalpia	>150	>225	>200	>150
a) Muffler e Cataldi, 1978				
b) Hochstein, 1990				
c) Benderitter e Cormy, 1990				
d) Nicholson, 1993				

gradiente medio nella crosta terrestre di 33 °C/km.

- Zone "calde" gradiente >
- Zone "fredde" gradiente < (es. Pianura Padana ha valori di gradiente termico di 12-25 °C/km AGIP, 1977)



**Art. 1 D.Lgs. 11 febbraio 2010, n. 22**

**“Riassetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche, a norma dell'articolo 27, comma 28, della legge 23 luglio 2009, n. 99”**

a) sono risorse geotermiche ad alta entalpia quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito superiore a 150 °C;

b) sono risorse geotermiche a media entalpia quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito compresa tra 90 °C e 150 °C;

**c) sono risorse geotermiche a bassa entalpia quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito inferiore a 90 °C.**

**RISORSE GEOTERMICHE A BASSA ENTALPIA  
UTILIZZABILI MEDIANTE POMPE DI CALORE**

# DECRETO LEGISLATIVO 25 novembre 2024 , n. 190

Disciplina dei regimi amministrativi per la produzione di energia da fonti rinnovabili, in attuazione dell'articolo 26, commi 4 e 5, lettera b) e d), della legge 5 agosto 2022, n. 118.

## **Allegato A**

### **Interventi in attività libera**

Sezione I - Interventi di nuova realizzazione

.....

*s) sonde geotermiche a circuito chiuso a servizio di edifici esistenti, che non alterano volumi e/o superfici, né comportano modifiche delle destinazioni di uso, interventi su parti strutturali dell'edificio, aumento del numero delle unità immobiliari o incremento dei parametri urbanistici, con potenza termica complessiva fino a 50 kW e **con profondità non superiore a 2 metri dal piano di campagna, se orizzontali, e non superiore a 80 metri dal piano di campagna, se verticali.***

## **Allegato B**

### **Interventi in regime di PAS (procedura abilitativa semplificata)**

Sezione I - Interventi di nuova costruzione

1. Sono soggetti al regime di PAS gli interventi relativi a

.....

*n) sonde geotermiche a circuito chiuso con potenza termica complessiva superiore a 50 kW e inferiore a 100 kW, **con profondità non superiore a 3 metri dal piano di campagna, se orizzontali, e non superiore a 170 metri dal piano di campagna, se verticali.***

# D.M. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica del 2 aprile 2026

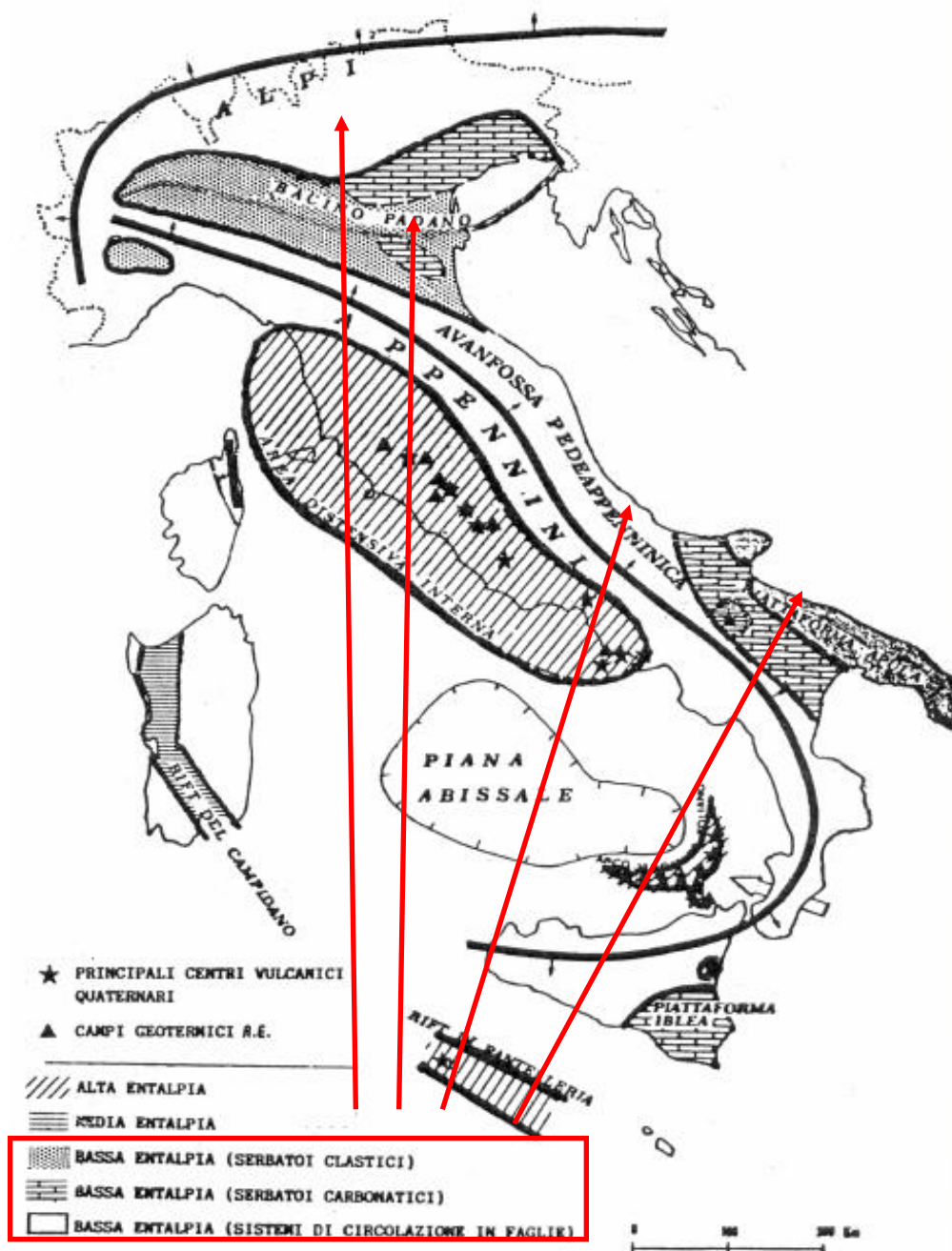
.....  
e) «*impianto a sonde geotermiche a circuito chiuso*»: impianti definiti all'articolo 10, comma 2, del decreto legislativo n. 22 del 2010, muniti di scambiatori termici interrati (sonde geotermiche), finalizzati al prelievo o alla cessione di calore al terreno, comprensivi di tutte le tubazioni poste sotto la superficie del suolo e/o sotto l'edificio, sia orizzontali che verticali, nonché le loro connessioni e giunzioni, i collettori e i dispositivi di chiusura e regolazione, incluse le pompe di calore (o i dispositivi di scambio termico), posti nel locale tecnico dell'edificio servito;

f) «*sonda geotermica*»: dispositivo tecnologico, facente parte di un impianto a sonde geotermiche a circuito chiuso di cui alla lettera e), progettato per attuare lo scambio termico tra il fluido termovettore di cui alla lettera d) in esso circolante e il terreno con cui il dispositivo stesso è in contatto. Ai fini del presente decreto, le sonde geotermiche sono distinte in:

- 1) «*sonde geotermiche orizzontali*»: dispositivi installati all'interno di scavi, a sviluppo prevalentemente orizzontale;
- 2) «*sonde geotermiche verticali*»: dispositivi installati all'interno di pozzi verticali appositamente realizzati nel terreno;

g) «*test di risposta termica*» o «*TRT*»: prova sperimentale che permette di rilevare le proprietà di scambio termico nel sottosuolo, necessarie per il corretto dimensionamento delle sonde geotermiche;

# CARTOGRAFIA DELLE POTENZIALITÀ GEOTERMICHE DELL'ITALIA



Dispositivi di utilizzo pompe di calore geotermiche interessano 1-3 centinaia di m di profondità



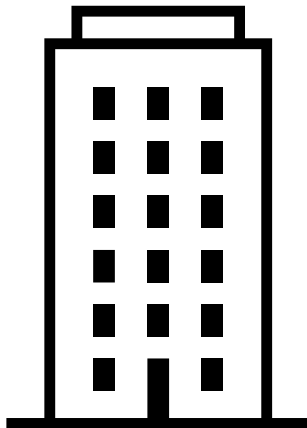
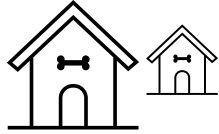
Interessamento della matrice terreno/roccia



Interferenza con acque sotterranee, loro uso e qualità

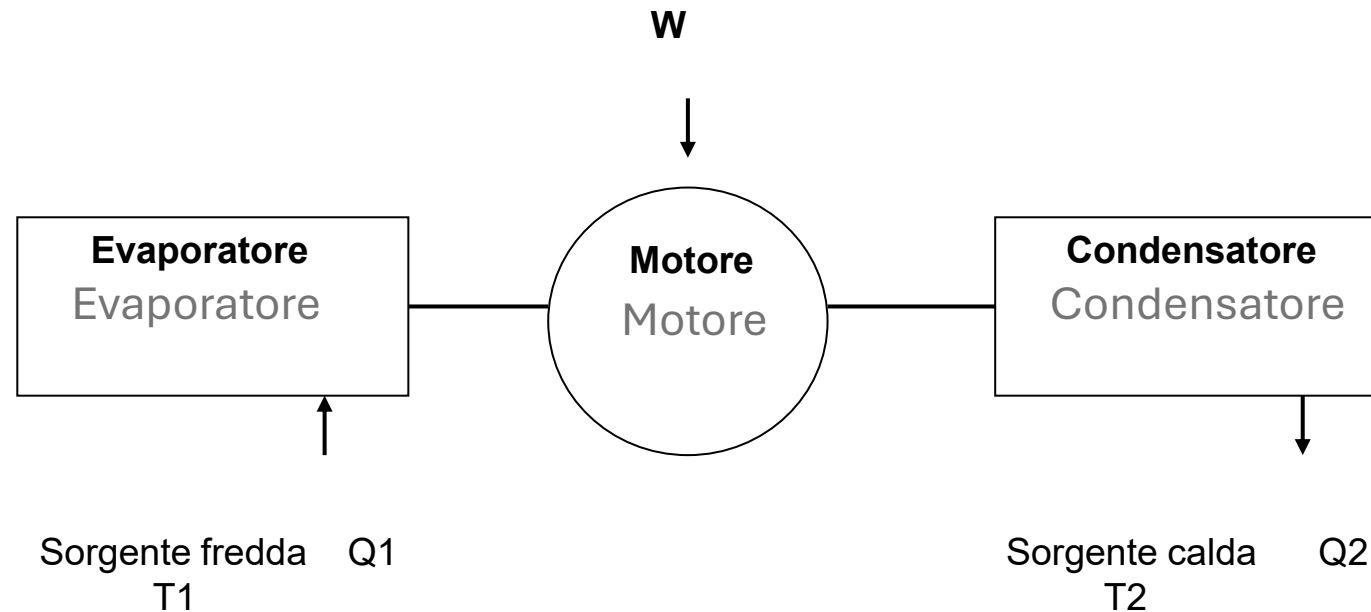
(ENI, 1988)

# FABBISOGNO ENERGETICO TERMICO DI TIPOLOGIE DI ABITAZIONI



<b>Tipologia</b>	<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	<b>kW</b>
Piccole abitazioni	<2500	<16
Grandi abitazioni	>2500	17÷25
Grandi palazzi		>25

# POMPA DI CALORE: attrezzatura che trasferisce calore dalla sorgente fredda ad una sorgente calda



$Q_1$  : quantità di calore prelevato nella sorgente fredda

$Q_2$  : quantità di calore restituita a livello della sorgente calda

$W$  : energia meccanica apportata al sistema

$T_1$  : temperatura di evaporazione alla sorgente fredda in °K (evaporatore) -  $T_1 = TC_1 + 273$  se

$TC_1$  è la temperatura in °C

$T_2$  : temperatura di condensazione alla sorgente calda in °K (condensatore) -  $T_2 = TC_2 + 273$  se

$TC_2$  è la temperatura in °C

Si può scrivere per il primo principio di Carnot :

$$\mathbf{Q2 = Q1 + W}$$

Si definisce un coefficiente di prestazione teorico (COP) che è il rapporto tra la quantità di energia trasmessa alla sorgente calda (Q2) e la quantità di energia spesa (W)

$$\mathbf{COP = Q2/W}$$

Applicando il secondo principio di Carnot, il COP teorico è uguale a:

$$\mathbf{COP = T2/(T2 - T1)}$$

Si può ugualmente dedurre un coefficiente di refrigerazione Cr, rapporto tra il calore assorbito all'evaporatore e l'energia ricevuta al compressione

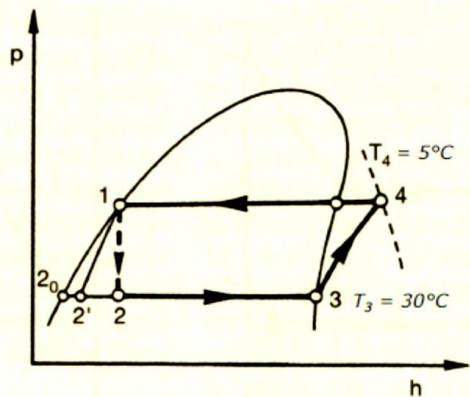
$$\mathbf{Cr = Q1/W}$$

Nella pratica, considerando la difficoltà di valutare i rendimenti delle apparecchiature, il COP è affetto da un coefficiente di 0,4 - 0,7.

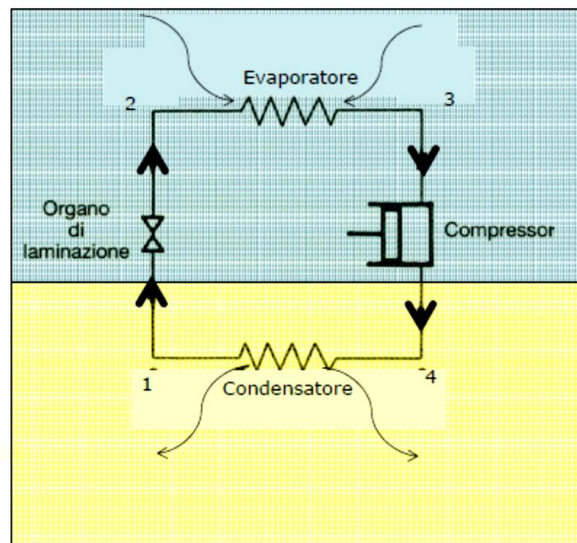
# SCHEMA MECCANICO FUNZIONAMENTO POMPA DI CALORE

*Funzionamento in riscaldamento*

*Il ciclo termodinamico*

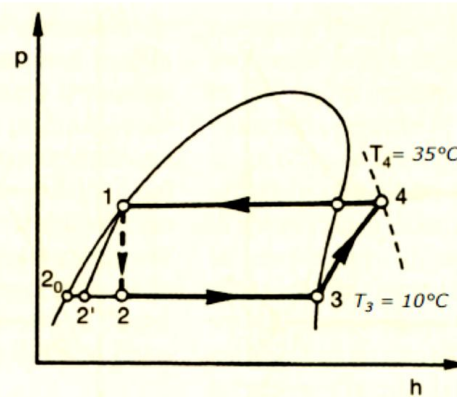


*Lo schema meccanico*

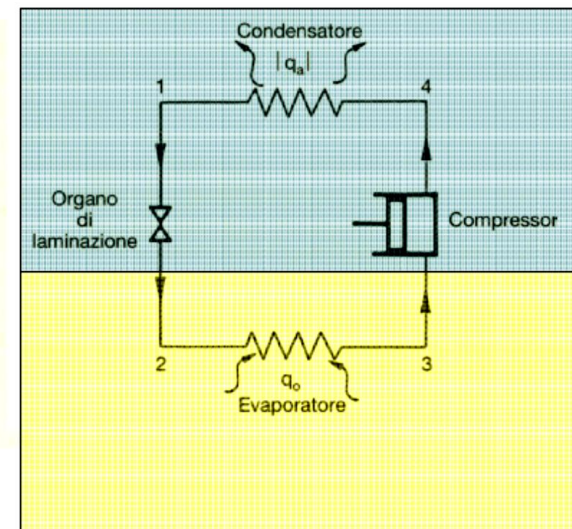


*Funzionamento in raffreddamento*

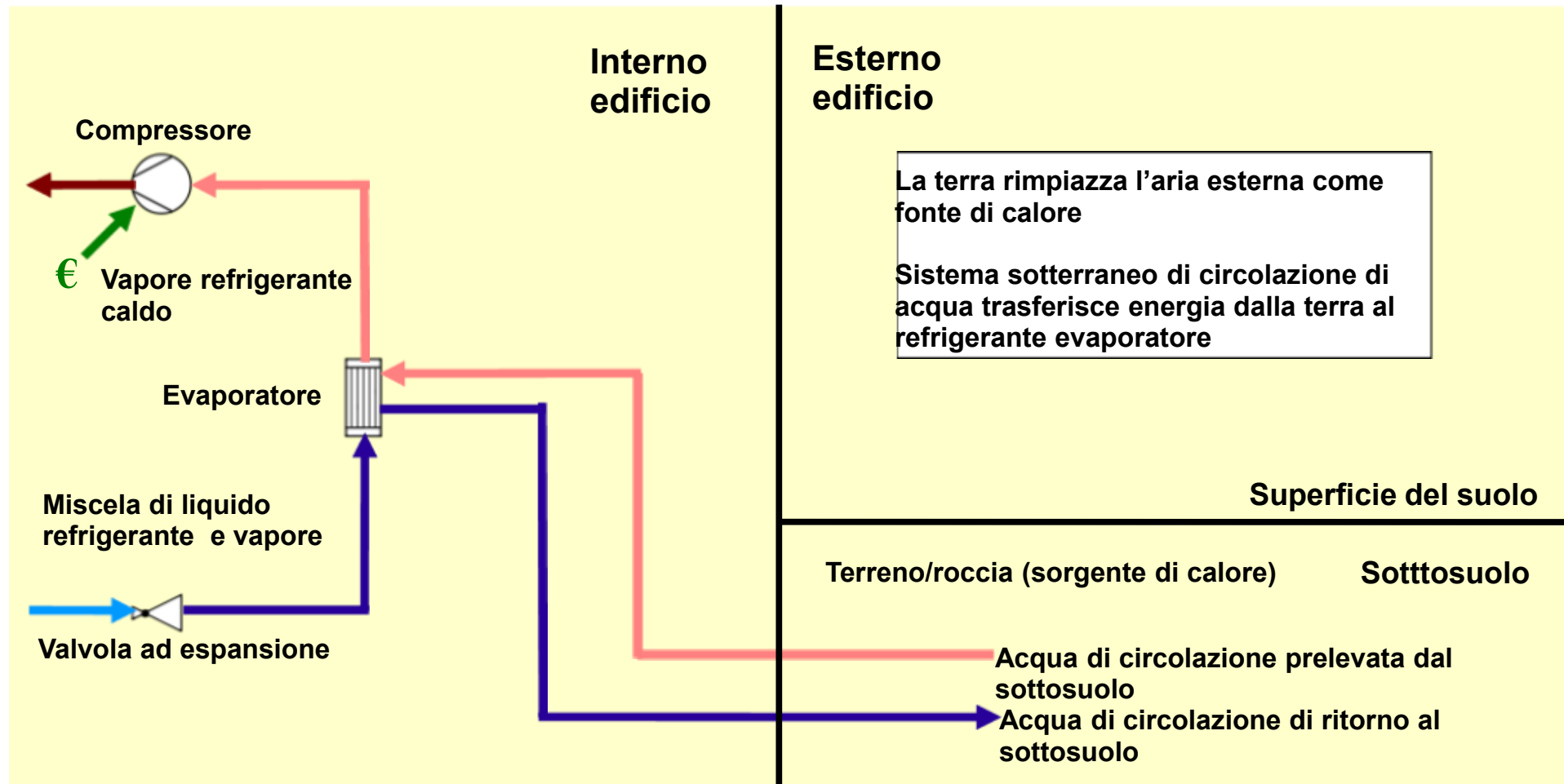
*Il ciclo termodinamico*



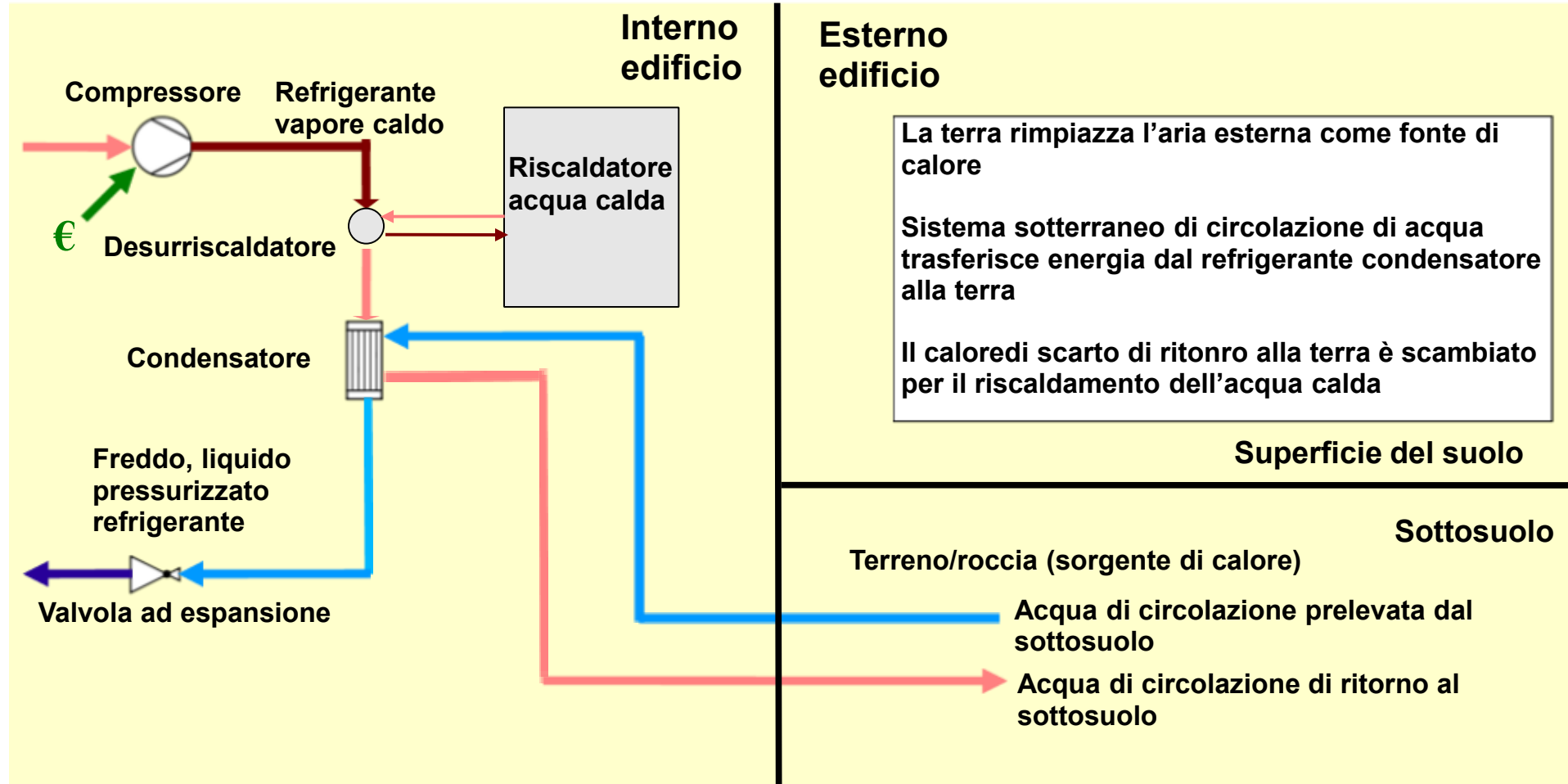
*Lo schema meccanico*



# POMPA DI CALORE GEOTERMICA - RISCALDAMENTO



# POMPA DI CALORE GEOTERMICA - RAFFREDDAMENTO



# PARAMETRI TERMICI

## **Conducibilità termica ( $W/m \cdot K$ )**

In condizioni stazionarie rappresenta il rapporto tra flusso di calore (quantità di calore trasferita nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie) e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore nel caso della conduzione termica; é una misura dell'attitudine di una roccia a trasmettere il calore.

## **Capacità calorica volumetrica ( $J/m^3 \cdot K$ )**

La capacità termica volumetrica rappresenta l'energia necessaria per aumentare la temperatura di un volume unitario di roccia di un grado Kelvin (K) o di un grado centigrado ( $^{\circ}C$ )

# CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE E TERMICHE DI ALCUNI TIPI DI TERRENI E ROCCE

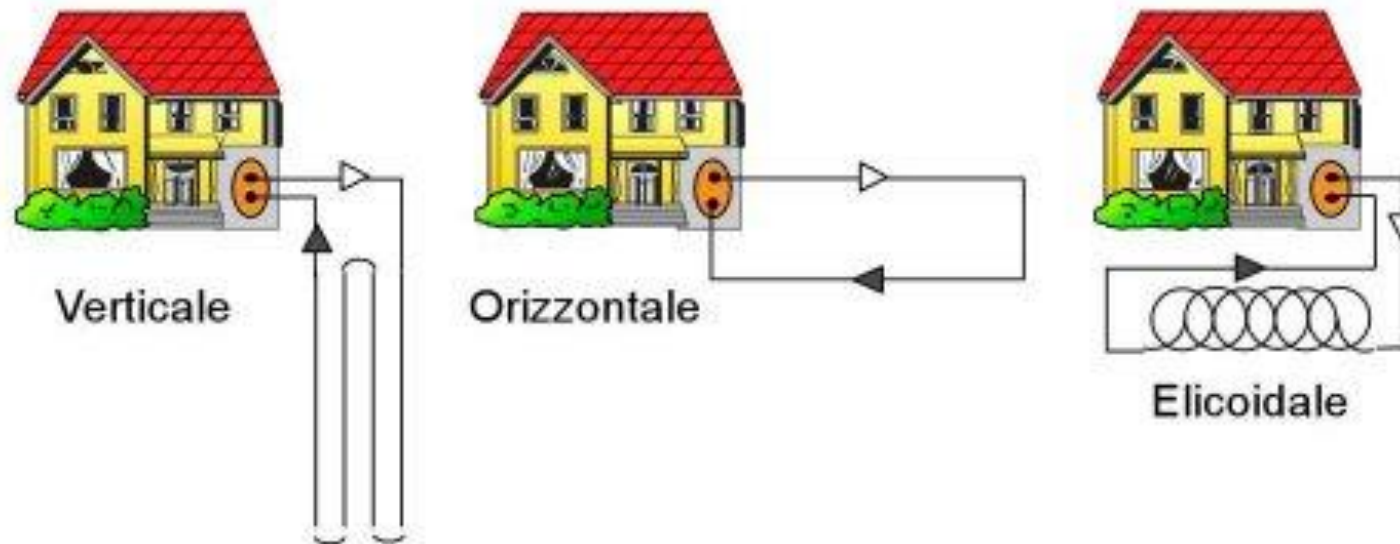
## Proprietà idrogeologiche

## Proprietà termiche

Roccia	Conducibilità idraulica (m/s)	Porosità	Conducibilità termica (W/m·K)	Capacità calorica volumetrica 10 <sup>6</sup> (J/m <sup>3</sup> ·K)
Ghiaia	$3 \cdot 10^{-4}$ - $3 \cdot 10^{-2}$	0.24-0.38	0.70-0.90	
Sabbia grossa	$9 \cdot 10^{-7}$ - $6 \cdot 10^{-3}$	0.31-0.46	0.70-0.90	
Sabbia fine	$2 \cdot 10^{-7}$ - $2 \cdot 10^{-4}$	0.26-0.53	0.70-0.90	
Limo	$1 \cdot 10^{-9}$ - $2 \cdot 10^{-5}$	0.34-0.61	1.20-2.40	2.4-3.3
Argilla	$1 \cdot 10^{-11}$ - $4.7 \cdot 10^{-9}$	0.34-0.60	0.85-1.10	3.0-3.6
Calcere, Dolomia	$1 \cdot 10^{-9}$ - $6.6 \cdot 10^{-6}$	0.34-0.60	1.50-3.30	21.3-5.5
Calcere carsificato	$1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-2}$	0.05-0.50	2.50-4.30	21.3-5.5
Arenaria	$3 \cdot 10^{-10}$ - $6 \cdot 10^{-6}$	0.05-0.30	2.30-6.50	21.3-5.5
Argillite	$1 \cdot 10^{-13}$ - $2 \cdot 10^{-9}$	0-0.10	1.50-3.50	2.38-5.5
Rocce ignee e metamorfiche fessurate	$8 \cdot 10^{-9}$ - $3 \cdot 10^{-4}$	0-0.10	2.50-6.60	
Rocce ignee e metamorfiche	$3 \cdot 10^{-13}$ - $2 \cdot 10^{-10}$	0-0.05	2.50-6.60	

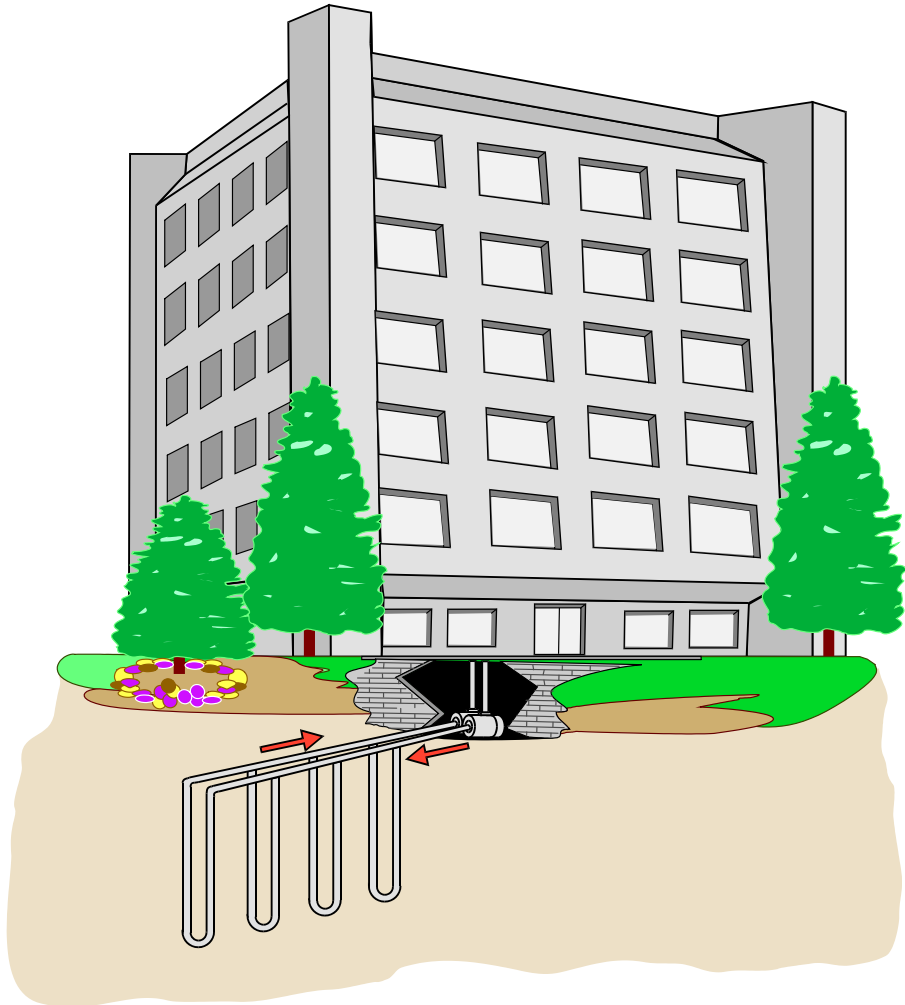
# 1 - SISTEMI A CIRCUITO CHIUSO

Pompe di calore collegate al terreno  
(sistemi a circuito chiuso)



**Localizzazione degli impianti**  
**Dimensionamento**  
**Metodi di perforazione e completamento**  
**Prove e verifiche**  
**Possibili effetti negativi**

# IMPIANTI A CIRCUITO CHIUSO

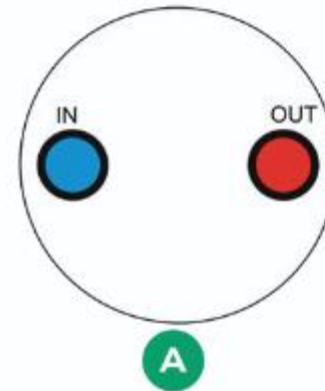


## Vantaggi

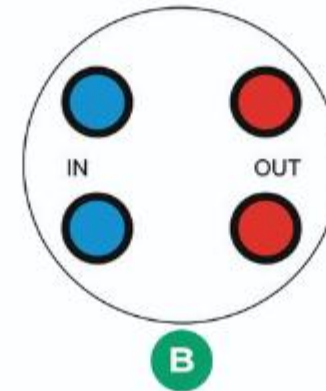
- Bassa manutenzione
- Non richiede acqua

## Svantaggi

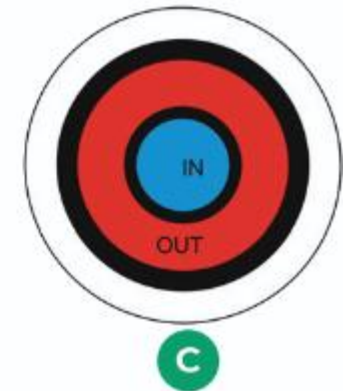
- Richiede spazi a disposizione
- Costi iniziali



A  
Singola

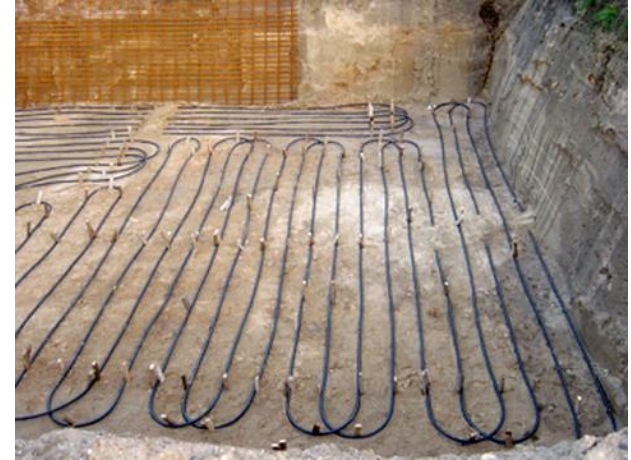


B  
Doppia



C  
Coassiale

# SONDE GEOTERMICHE ORIZZONTALI



Modesta profondità: qualche metro dal piano campagna (1-3 m)

**Forte influenza delle condizioni meteo-climatiche esterne**

# SONDA GEOTERMICA

Una sonda geotermica verticale è uno scambiatore di calore inserito in una perforazione.

L'acqua circola in un doppio tubo ad U ed estrae l'energia dal terreno.

Per mezzo di una pompa di calore il fluido è portato a 35°C e passa attraverso il riscaldamento a pavimento.

La geotermia fornisce il 75% di energia per le installazioni, mentre il restante 25% è assicurato dall'elettricità consumata dalla pompa di calore.



# PRESENZA DI H<sub>2</sub>O

## Mezzi insaturi

L'umidità incrementa:

- la conducibilità termica della matrice solida;
- il contatto tra sonda e la matrice solida con aumento della resa.

## Mezzi saturi

L'acqua favorisce:

- il contatto tra la sonda e la matrice solida con aumento della resa;
- il ripristino del campo termico modificato.

# LOCALIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI

## Limitazioni nell'installazione delle sonde geotermiche

- All'interno delle **aree di salvaguardia dei pozzi e delle sorgenti**
- Nelle zone dove si possono creare problemi per la falda utilizzata (necessità di uno studio idoneo): **zone vulnerabili o vulnerate (siti contaminati da bonificare), vicinanza di discariche di rifiuti**
- In **zone franose** dove i movimenti di massa possono compromettere la funzionalità dell'opera e la dispersione di fluidi nell'ambiente
- In **zone alluvionabili** dove l'azione di corsi d'acqua può compromettere la funzionalità dell'opera e la dispersione di fluidi nell'ambiente

*Nel caso di un campo di sonde geotermiche, localizzazione **lungo le linee isopiezometriche**, onde evitare maggiori interferenze e la formazione di un pennacchio termico nelle acque sotterranee*

# MODALITÀ DI PERFORAZIONE E COMPLETAMENTO DELLE SONDE GEOTERMICHE

## SCELTA DELLA TIPOLOGIA DI PERFORAZIONE

### **-tricono a foro aperto e circolazione di fanghi bentonitici**

Necessita di:

- vasca per il recupero dei fanghi e la separazione dei detriti
- quantitativi di acqua significativi (se non si utilizzando fanghi bentonitici).
- smaltimento detriti di perforazione

Problemi di posa in opera sonde in caso di perforo con:

- **dimensioni disomogenee;**
- **manca di verticalità.**

### **- tricono con tubi di rivestimento e circolazione con fanghi bentonitici- aria-schiumogeni biodegradabili**

Necessità di:

- quantitativo significativo di acqua per produzione fango.
- infissione tubi di rivestimento nel solo terreno superficiale per mantenere verticalità perforo fino al substrato roccioso.

## - martello a fondo foro con tubi di rivestimento

Necessità di

- utilizzo di compressore per produrre aria in pressione eventualmente additivata con schiumogeni biodegradabili;
- infissione tubi di rivestimento nel solo terreno superficiale per mantenere verticalità perforo fino al substrato roccioso.

Problemi di:

- **stabilità del perforo;**
- **costo significativo.**

Vantaggi:

- velocità di esecuzione del perforo.

# DIMENSIONAMENTO

## Stima preliminare caratteristiche sonde geotermiche (orientativo ma da verificare)

Litotipo	Conducibilità termica (W/m/K)	Potenza di estrazione (W/m)	Lunghezza sonda geotermica per kW di potenza di riscaldamento (m)	
			COP = 3	COP 3.5
Ghiaia, sabbia non saturi	0.4	>20	>33	>36
Ghiaia e sabbia saturi	1.8-2.4	55-65	10-12	11-13
Argilla, limo saturi	1.7	30-40	17-22	18-24
Arenaria	2.3	55-65	10-12	11-13
Calcere	2.8	45-60	11-15	12-16
Granito	3.4	55-70	9.5-12	10-13
Basalto	1.7	35-55	12-19	13-20
Gneiss	2.9	60-70	9.5-11	10-16
Terreni sciolti non saturi	<1.5	20	33	36
Terreni sciolti saturi e rocce	1.5-3	50	13	14
Rocce ad elevata conducibilità termica	>3	70	19.5	10

# METODI TABELLARI DI DIMENSIONAMENTO DELLA SGV

## Schema di classificazione della norma VDI 4640:2001

Tipo di sottosuolo	Potenza specifica di estrazione [W/m]	
	1800 h/anno	2400 h/anno
Terreno termicamente scadente $k < 1,5 \text{ W/(mK)}$	25	20
Rocce regolari e sedimenti saturi $k = 1,5 \div 3 \text{ W/(mK)}$	65	50
Rocce con $k > 3 \text{ W/(mK)}$	84	70
Ghiaie e sabbie asciutte	<25	<20
Ghiaie e sabbie sature	65÷80	55÷65
Limi e argille umidi	35÷50	30÷40
Calcari massivi	55÷70	45÷60
Arenarie	65÷80	55÷65
Magmatiti acide (es.: graniti)	65÷85	55÷70
Magmatiti basiche (es.:basalti)	40÷-65	35÷55
Gneiss	70÷85	60÷70
Sabbie e ghiaie in forte flusso idrico		80÷100

# METODI TABELLARI

## DI DIMENSIONAMENTO DELLA SGV

### Schema di classificazione della norma del Cantone di Neuchatel-CH, 2009

In presenza di carsismo si consiglia di modificare la lunghezza L delle sonde, in relazione alla quasi totale assenza di gradiente geotermico, sulla base dei seguenti fattori:

L < 120 m - allungare la lunghezza della sonda del 15%;

L > 120 m - allungare L del 30%

Consigliato approccio di dimensionamento con metodi numerici per numero sonde > 4

k terreno W/ (m K)	Potenza specifica di estrazione (W/m) - Configurazione a doppia U			
	1800 h/anno		2200 h/anno	
	Senza falda	Falda attiva	Senza falda	Falda attiva
1.0	31.6	36.6	29.8	35.0
1.1	32,8	37.8	30.9	36.2
1.2	34.0	39.0	32.1	37.3
1.3	35.1	40.2	33.2	38.5
1.4	36.2	41.3	34.2	39.6
1.5	37.3	42.4	35.3	40.6
1.6	38.4	43.4	36.3	41.7
1.7	39.4	44.5	37.3	42.7
1.8	40.5	45.6	38.3	43.8
1.9	41.6	46.7	39.4	44.8
2.0	42.6	47.7	40.4	45.8
2.1	43.7	46.7	41.4	46.8
2.2	44.7	49.7	42.4	47.8
2.3	45.6	50.7	42.4	48.8
2.4	46.6	51.6	44.3	49.7
2.5	47.6	52.5	45.3	50.6
2.6	48.5	53.4	46.2	51.5
2.7	49.4	54.3	47.1	52.4
2.8	50.3	55.1	47.9	54.8
2.9	51.2	55.9	48.8	54.0
3.0	52.0	56.7	49.7	54.8
3.1	52.9	57.5	50.5	55.6
3.2	53.7	58.3	51.3	56.4
3.3	54.7	59.1	52.1	57.2
3.4	55.3	59.3	52.9	57.8
3.5	56.3	60.5	53.7	58.6
3.6	56.8	61.1	54.4	59.3
3.7	57.5	64.7	55.2	60.0
3.8	58.3	65.5	55.9	60.6
3.9	59.0	63.1	56.6	61.2
4.0	59.7	63.7	57.3	61.7

# METODI ANALITICI

## DI DIMENSIONAMENTO DELLA SGV

### Schema di classificazione della norma ASHRAE, 1995

$$Lh = \frac{q_s \cdot R_{gs} + (q_{lh} - W_h) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{T_{geo} - T_w - T_{ph}}$$

$q_s$  = potenza media invernale scambiata con il terreno (W)

$R_{ga}$  = resistenza unitaria del terreno in condizioni di stabilità pluriennale (mK/W)

$q_{lh}$  = potenza di progetto (picco) invernale di riscaldamento (W) > 0

$W_h$  = potenza elettrica di picco del compressore della PdC (W)

$R_b$  = resistenza unitaria termica della sonda (mK/W)

$PLF_m$  = fattore di carico/parzializzazione mensile

$R_{gm}$  = resistenza unitaria del terreno riferita all'impulso mensile (mK/W)

$R_{gd}$  = resistenza unitaria del terreno riferita all'impulso giornaliero (mK/W)

$F_{sc}$  = fattore di perdita di cortocircuito termico nei tubi della sonda geotermica

$T_{geo}$  = temperatura del terreno indisturbato dalla sonda (K)

$T_w$  = temperatura media del fluido [K] = 1/2 ( $T_{win} + T_{wout}$ )

$T_{ph}$  = temperatura di penalizzazione invernale (K) > 0 in inverno = indica la reciproca influenza termica a lungo termine tra le sonde attraverso il terreno

# METODI ANALITICI

## DI DIMENSIONAMENTO DELLA SGV

### Schema di classificazione della norma ASHRAE, 2007 (norma UNI 11466)

$$L_c = \frac{Q_a \cdot R_{ga} + (Q_c - W_c) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{T_g - T_m - T_p}$$

Raffrescamento

$$L_h = \frac{Q_a \cdot R_{ga} + (Q_h - W_h) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{T_g - T_w - T_p}$$

Riscaldamento

$Q_a$  = potenza media annua scambiata con il terreno (+ heating – cooling) [W];

$Q_c$  = carico termico di progetto per il raffrescamento (negativo) [W];

$Q_h$  = carico termico di progetto per il riscaldamento (positivo) [W];

$W_c$  ( $W_h$ ) = potenza elettrica assorbita, al carico  $Q_c$  ( $Q_h$ ) [W];

$PLF_m$  = fattore di carico parziale del mese di progetto;

$F_{sc}$  = fattore di penalizzazione per scambi termici interni ( $\approx 1.05$ );

$R_b$  = resistenza termica della sonda [mK/W];

$R_{ga}$  = resistenza termica del terreno per impulsi annuali;

$R_{gm}$  = resistenza termica del terreno per impulsi mensili;

$R_{gd}$  = resistenza termica del terreno per impulsi giornalieri;

$T_g$  = temperatura del terreno indisturbato;

$T_m$  = temperatura media del fluido;

$T_p$  = fattore di penalizzazione (in °C) per l'interferenza fra sonde (+ heating – cooling).

# DIMENSIONAMENTO DI UNA SONDA GEOTERMICA VERTICALE METODO ASHRAE

*“American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers”*  
(Ingersoll, 1954 e Kavanaugh & Rafferty, 1997)

## Dati di input

- Fabbisogno energetico totale richiesto.
- Caratteristiche dello scambiatore a terreno (diametri, spessori, conducibilità termica dei tubi, diametro della perforazione).
- Proprietà termofisiche del terreno (conducibilità termica, diffusibilità termica, T indisturbata) e velocità della falda acquifera.
- Informazioni tecniche riguardanti i COP delle pompe di calore/refrigerazione, le potenze elettriche assorbite, le caratteristiche del fluido conduttore nel tubo ad “U” ecc.

## Modello

Relazioni matematiche che forniscono i risultati

## Dati di output

Lunghezza necessaria della perforazione verticale, sia per un funzionamento estivo che per un funzionamento invernale

Tamagnone M., 2012

# DIMENSIONAMENTO SONDA GEOTERMICA

## Metodo ASHRAE

Microsoft Excel - ASHRAE.xls

Metodo ASHRAE di dimensionamento per le sonde verticali

1 Date le dimensioni dell'edificio:

Superfici: 320 m<sup>2</sup>  
Volume: 960 m<sup>3</sup>

E un fabbisogno energetico quantificabile in:

Watt necessari a raffreddare (estate): q<sub>e</sub> = -7700 W<sub>e</sub>  
Watt necessari a riscaldare (inverno): q<sub>h</sub> = 8500 W<sub>e</sub>

2 Dalle analisi geotecniche si ricavano le seguenti caratteristiche in situ del sottosuolo:

0m P.C.

	Argilla	Sabbia	Ghiaia	Valori media	U.M.
Temperatura indisturbata t <sub>g</sub>	14	14	14	14	°C
Capacità termica specifica c <sub>p</sub>	0,4	0,2	0,1	0,2	°C
Peso di volume ρ	1,7	1,85	1,9	1,84	Kg/m <sup>3</sup>
Conducibilità termica λ <sub>g</sub>	1,5	1,8	2,1	1,86	W/m*°C
Diffusività termica α <sub>g</sub>	0,00	0,00	0,00	8,4E-07	m <sup>2</sup> /s

profondità tot raggiunte: 100 m

3 Prestazioni PdC:

Valore medio (estivo) del coeff. Di prestazione del refi COP<sub>e</sub> = 4,05 °C  
Valore medio (invernale) del coeff. di prestazione del COP<sub>h</sub> = 4,7 °C

3.1 Caratteristiche del fluido circolante nelle sonde:

Estate	Temp. del fluido entrante nella sonda geotermi	t <sub>in</sub> = 32 °C	Δt <sub>e</sub> = 4
	Temp. del fluido uscente dalla sonda geotermi	t <sub>co</sub> = 28 °C	
Inverno	Temp. del fluido entrante nella sonda geotermi	t <sub>in</sub> = 2 °C	Δt <sub>h</sub> = 4
	Temp. del fluido uscente dalla sonda geotermi	t <sub>co</sub> = 6 °C	

Temp. di funzionamento dell'impianto in base al fabbisogno totale di energia (palla due stazioni)

Dati di input

Microsoft Excel - ASHRAE.xls

Metodo ASHRAE di dimensionamento per le sonde verticali

1) Lunghezza necessaria della perforazione "L":

L<sub>e</sub> per un funzionamento estivo (cooling) → 143 m

$$L_e = \frac{-q_e * R_{ge} + (-q_e - W_d) * (R_g + PLF_m * R_{gm} + R_{gd} * F_{gt})}{t_g \left( \frac{t_{in} + t_{co}}{2} \right)_e - (t_g)}$$

L<sub>h</sub> per un funzionamento invernale → 160 m

$$L_h = \frac{+q_h * R_{gd} + (+q_h - W_d) * (R_g + PLF_m * R_{gm} + R_{gd} * F_{gt})}{t_g \left( \frac{t_{in} + t_{co}}{2} \right)_h - (t_g)}$$

2) La profondità delle sonde geotermiche è stata così ripartita: per le sonde geotermiche, disposte con geometria in linea:

+F20100 | 16 | n 2 sonde geotermiche di 70m di profondità ciascuna

Sonda 1      Sonda 2

Ogni pozzo sarà realizzato a una profondità di: 80 m

2) In presenza di falda acquifera in movimento:  
L'estensione della perturbazione termica in presenza di falda acquifera in movimento nella stessa direzione del fluido, a una distanza di 10m dal foro è pari a:

θ<sub>10metri</sub> = 16,65 °C  
ΔT° = 2,65 °C rispetto al terreno indisturbato

Dati di output

# **METODI NUMERICI DI DIMENSIONAMENTO DELLA SGV**

I metodi numerici, basati prevalentemente sui metodi degli elementi finiti e delle differenze finite, sono adatti all'implementazione su computer.

Si tratta di alcuni software commerciali quali COMSOL, EED EWS, etc.

# TEST DI RESA TERMICA

Un'ulteriore prova può essere effettuata alla conclusione della prova di tenuta allo scopo di valutare l'efficienza della sonda geotermica realizzata e poter dimensionare le successive sonde (nel caso di un campo di sonde geotermiche).

Il test di resa termica consiste nel simulare l'utilizzo della sonda e prevede il suo funzionamento per 3-5 giorni (raggiungendo quindi un regime semi-stazionario) durante i quali si opera il prelievo di calore dal terreno mediante uno scambiatore; si registra l'effetto che si manifesta nell'intorno della sonda per mezzo della misura della temperatura nelle tubazioni di mandata e di ritorno.

## Alcuni test di risposta termica:

**Swedish Test Rig**

**US Test Rig**

**UBeG Test Rig**



Swedish Test Rig



US Test Rig



UBeG Test Rig

# GROUND RESPONSE TEST (GRT)

Il comportamento termico del terreno interessato da una pompa di calore può essere studiato mediante un apposito test.

Il test si basa sull'immissione (oppure estrazione) di una quantità di calore nota e costante all'interno di una sonda di prova (sonda pilota) che sarà anch'essa utilizzata nella configurazione finale dell'impianto, misurando le temperature di andata e ritorno. Immettendo o estraendo calore le proprietà termiche del sottosuolo non si modificano sostanzialmente, ad eccezione del caso in cui si registra una parziale migrazione di acqua in mezzi insaturi.

L'immissione di calore avviene mediante resistenze elettriche, anche se si sono sperimentati anche altri sistemi.

Il test dovrebbe avere una durata minima di 50 ore di funzionamento escludendo nell'interpretazione dei dati i valori registrati nelle prime ore in quanto è necessario un po' di tempo affinché il flusso termico possa stabilizzarsi.

Dal momento che il trasferimento dell'onda di calore nel perforo durante una prova può essere considerato puramente conduttivo, in direzione radiale e costante lungo la profondità, il comportamento fisico può essere approssimato ad una sorgente lineare in un mezzo omogeneo descrivibile mediante la relazione (Eskilson P, 1987):

$$T_t - T_o = \frac{Q_c}{4\pi\lambda} \left[ \ln\left(\frac{4d_t t}{r^2}\right) - \gamma \right] + Q_c r$$

$T_t$  = temperatura (°K) al tempo  $t$  (s)

$T_o$  = temperatura iniziale (°K) del sottosuolo indisturbato dal flusso termico indotto

$Q_c$  = flusso termico costante utilizzato per il test ( $W m^{-1}$ )

$\lambda$  = conducibilità termica ( $W m^{-1} °K^{-1}$ )

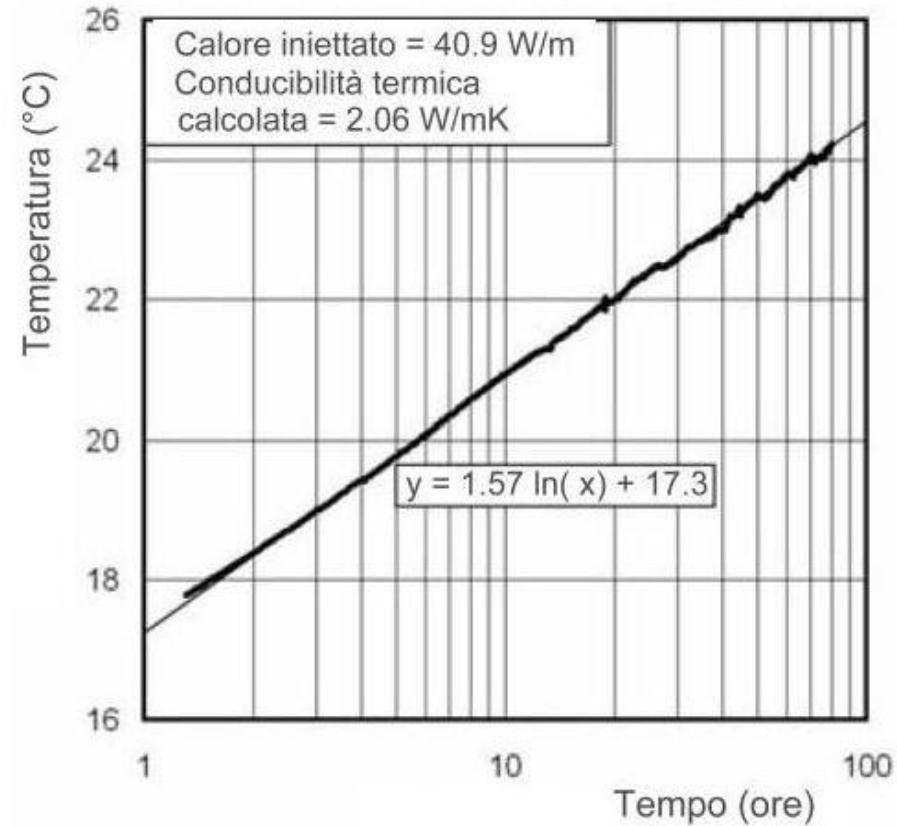
$dt$  = diffusività termica ( $m^2 s^{-1}$ )

$r$  = raggio del perforo (m)

$\gamma$  = costante di Eulero (0.5772)

L'accuratezza della risoluzione aumenta con la durata della prova quando si tende a passare da un regime transitorio ad uno stazionario e la componente temporale tende quindi a perdere importanza. Il massimo errore è del 2.5% per  $t \geq 20 r^2/dt$  e del 10% per  $t \geq 5 r^2/dt$  (Gehlin S., 2002); questo secondo valore è comunque accettato nelle applicazioni.

# RISULTATO GRT



$$\lambda = \frac{Q_c}{4\pi m}$$

La **pendenza  $m$**  della **retta interpolatrice** viene utilizzata per il calcolo della conducibilità termica secondo la relazione riportata.

## MODALITÀ DI REALIZZAZIONE

### Rischio idraulico

- Durante la perforazione **deve essere realizzata la stratigrafia dei terreni attraversati.**
- Lo spazio tra la perforazione e la tubazione deve essere riempito dal basso verso l'alto con una sospensione di materiale cementizio che garantisca il **completo isolamento del perforo.**
- La tubazione e la sonda geotermica devono essere protetti in modo tale da evitare la perdita di liquidi verso le acque sotterranee, in modo particolare i **fluidi antigelo** (addizionati in genere all'acqua in concentrazioni del 15-20%).

?

# MODALITÀ DI COMPLETAMENTO DELLE SONDE GEOTERMICHE

## Rischio idraulico

- Per il **ritombamento del perforo** utilizzo di miscela cemento, acqua e bentonite da iniettare in pressione, a partire dal fondo del foro sino al piano campagna.
- Le sonde geotermiche dovranno essere di **polietilene ad alta densità** (PE-HD) e senza suture tra testa e piede. La pressione nominale minima dovrà essere pari a PN16.
- **I collegamenti** devono essere completati esclusivamente dal produttore oppure mediante appositi giunti termosaldati.

# PROVE E VERIFICHE

## Rischio idraulico

### PROVA DI TENUTA

Deve essere eseguita una prova di tenuta che può essere eseguita a seconda dei casi:

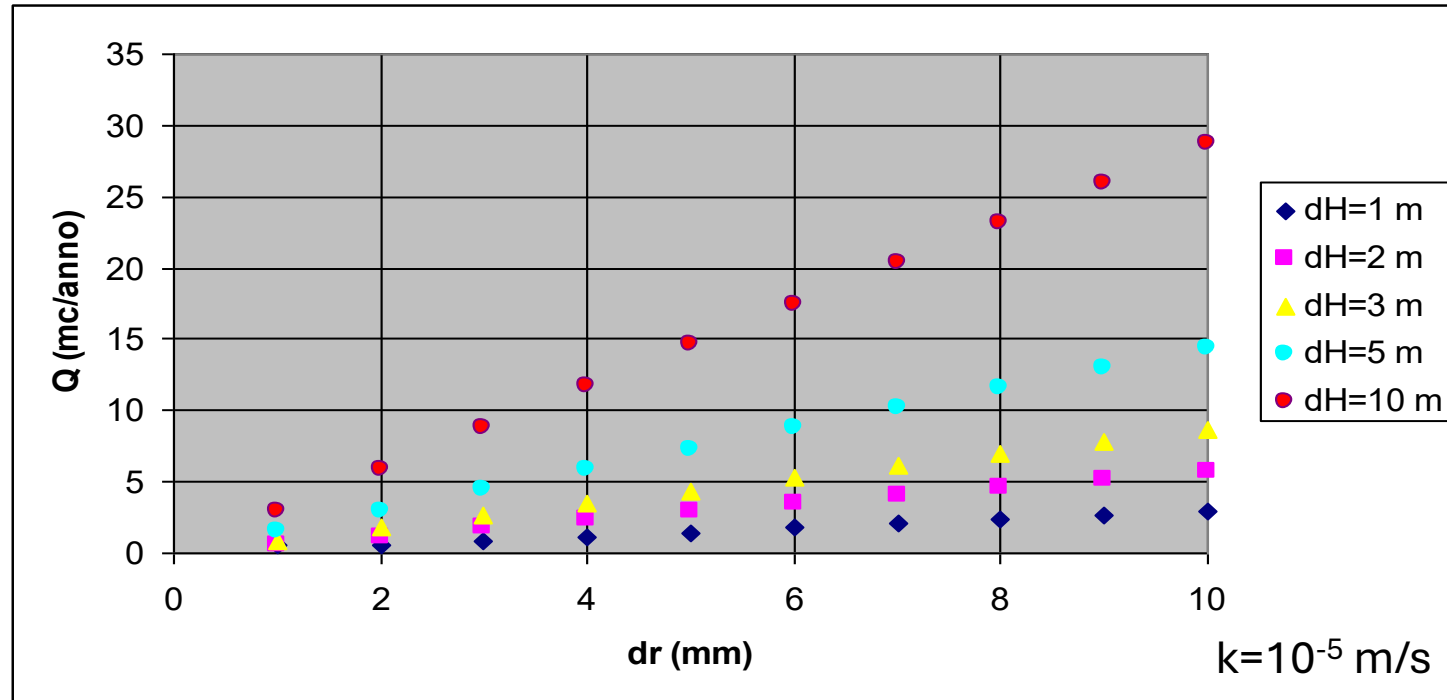
**-con aria** (pressione di prova: minimo 10 bar; durata: minimo 1 ora; diminuzione di pressione tollerata: 0,2 bar; incremento di 0,1/m oltre 80 m di profondità)

**-con acqua** (pressione di prova: minimo 6 bar; durata: minimo 4 ore; diminuzione di pressione tollerata: 0,5 bar).

In caso di esito negativo della prova di tenuta, la sonda deve essere abbandonata, previa cementazione con miscela di cemento, acqua e bentonite.

# POSSIBILI EFFETTI NEGATIVI ATTESI: INTERCOMUNICAZIONE FALDE

Portata di scambio tra acquiferi in funzione della differenza di carico idraulico  $dH$  (m) e dello spessore dell'intercapedine  $dr$  (mm) tra perforo e tubazione



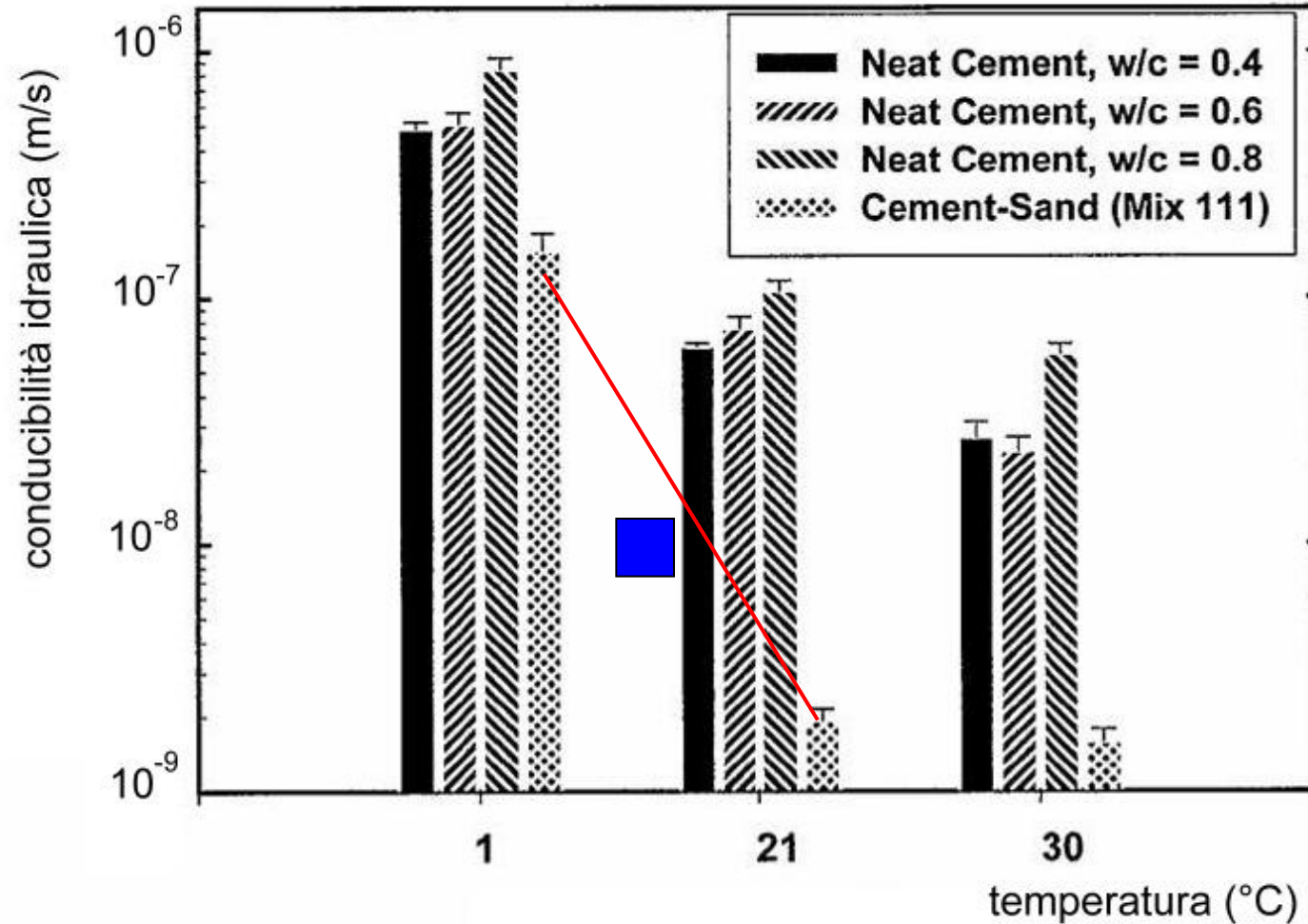
**Lacombe S., Sudicky E.A., Frapce S.K., Unger A.J.A. (1995)** - "Influence of leaky boreholes on cross-formational groundwater flow and contaminant transport". Water Res. Res. Vol. 31, n° 8, August 1995, 1871-1882

**Silliman S., Higgins D. (1990)** - "An analytical solution for steady-state flow between aquifers through an open well". Ground Water 28, no. 2: 184-190.

**Sudicky E.A., Unger A.J.A., Lacombe S. (1995)** - "A noniterative technique for the direct implementation of wellbore boundary conditions in three-dimensional heterogeneous formations". Water Res. Res., vol. 31, n° 2, February 1995, 411-415

# Variazione della conducibilità idraulica di diversi tipi di cementazioni nei sistemi a circuito chiuso (Allan M.L., Philippacopoulos A.J. , 1999)

“Cemento-sabbia superplasticizzato”



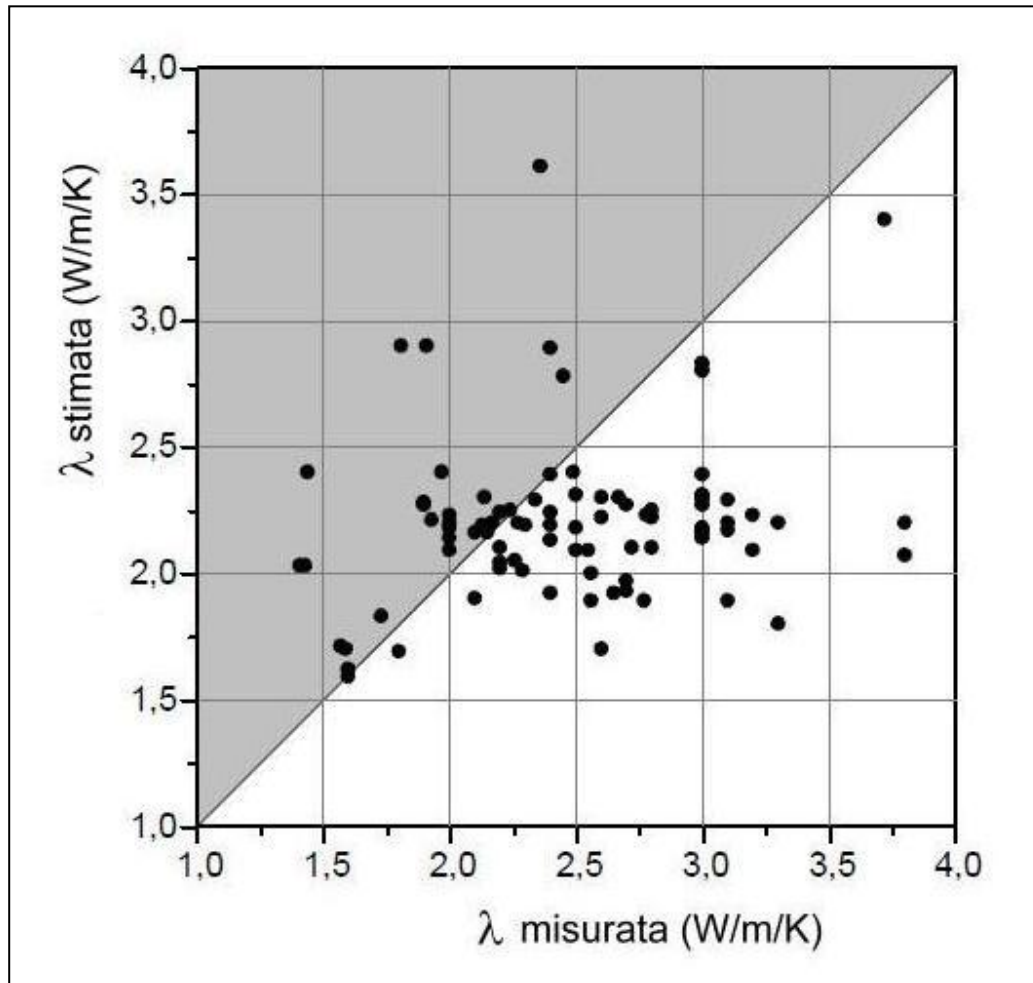
# CONFRONTO TRA VALORI STIMATI E MISURATI DI CONDUCIBILITA' TERMICA (Sanner E. et al., 2008)

## Rischio termico

**26% sovrastima**

**66% sottostima**

**8% stima corretta**



# INTERFERENZA TEMPERATURE IN UN CAMPO DI SONDE

## Rischio termico

Impatto ridotto dal punto di vista della riduzione del potenziale termico, che viene caratterizzato da un raggio di influenza intorno a **20 m**, con valori a lungo termine di circa 10 m (Gabrielsson A. et al., 2000).

Se si ha un campo di sonde nel raggio di reciproca influenza, si ha un maggiore effetto areale del disturbo creato dalle opere e una maggiore propagazione del fronte termico.

Nel caso di un utilizzo sincrono (riscaldamento-riscaldamento oppure raffreddamento-raffreddamento di due impianti posti nelle vicinanze), nella letteratura scientifica si riportano alcune distanze da mantenere tra i diversi impianti per non creare una interferenza tra le differenti proprietà (pubbliche o private) che utilizzano questa energia.

In **Danimarca** si prevede ufficialmente una distanza minima di 20 m, in **Germania** intorno a 6 m e di 12 m tra due sistemi adiacenti.

La **Regione Lombardia** prevede una distanza minima di **4 m** dalla proprietà limitrofa.

## **PRECAUZIONI**

### **Rischio chimico**

- Mentre nel mezzo insaturo i problemi sono contenuti, deve essere effettuata una ricostruzione della stratigrafia per poter curare in modo particolare la **separazione degli acquiferi attraversati** nel mezzo saturo
- Utilizzo di miscele particolari (cemento ad elevata conducibilità termica) per assicurare la tenuta dell'isolamento.

## **UTILIZZO DI FLUIDI ANTIGELO**

### **Rischio chimico**

In genere sono utilizzati le seguenti sostanze:

- Glicole etilenico (etan diolo) - Glicole propilenico (propan-1,2 diolo)
- Cloruro di calcio ( $\text{CaCl}_2$ )
- Alcool etilico (etanolo).

**- Vietato l'utilizzo di inibitori della corrosione.**

# **RISCHIO CHIMICO**

1-Perdita di refrigeranti

2-Fuoriuscita del fluido vettore

3-Afflussi di gas di origine geochimica ed antropica

## VALUTAZIONE SOSTANZE UTILIZZATE COME ANTICONGELANTI BASATA SU ANALISI DEL RISCHIO

Elemento	Metanolo	Etanolo	Glicole etilenico	Glicole propilenico	K-Acetano	Ca,Mg - Acetano	Urea
Costi operativi	3	3	3	2	2	2	2
Corrosione	2	2	3	3	2	2	1
Perdite	3	2	-	2	1	1	1
Rischi salute	1	2	2	3	3	3	3
Rischi ambientali	2	2	2	3	2	2	3
Infiammabilità	1	1	3	3	3	3	3
Solubilità in acqua (g/L)	completa	completa	completa	completa	2530	300-1200	1200
Emivita in suoli (ore)	24-168	2.6-24	48-288	168-672	-	-	-
Emivita in acque sotterranee (ore)	24-168	13-52	96-576	336-1344	-	-	-
Possibile divieto d'uso	1	2	2	3	2	2	2

1- nessun problema

2 - problemi potenziali non prevedibili

**3 - potenziali problemi e conseguente grande attenzione all'uso**

**(Heinonen et al., 1997, Basta S., Mischio F., 2008, Howard et al., 1991)**

# **PRECAUZIONI**

## **Rischio idraulico-chimico**

1-Presenza di suoli contaminati in superficie

2-Struttura idrogeologica con acquiferi sovrapposti e con diverso carico idraulico

3-Presenza di falde in pressione.



# **PALANCOLE TERMOATTIVE (GEOSTRUTTURA ENERGETICA)**

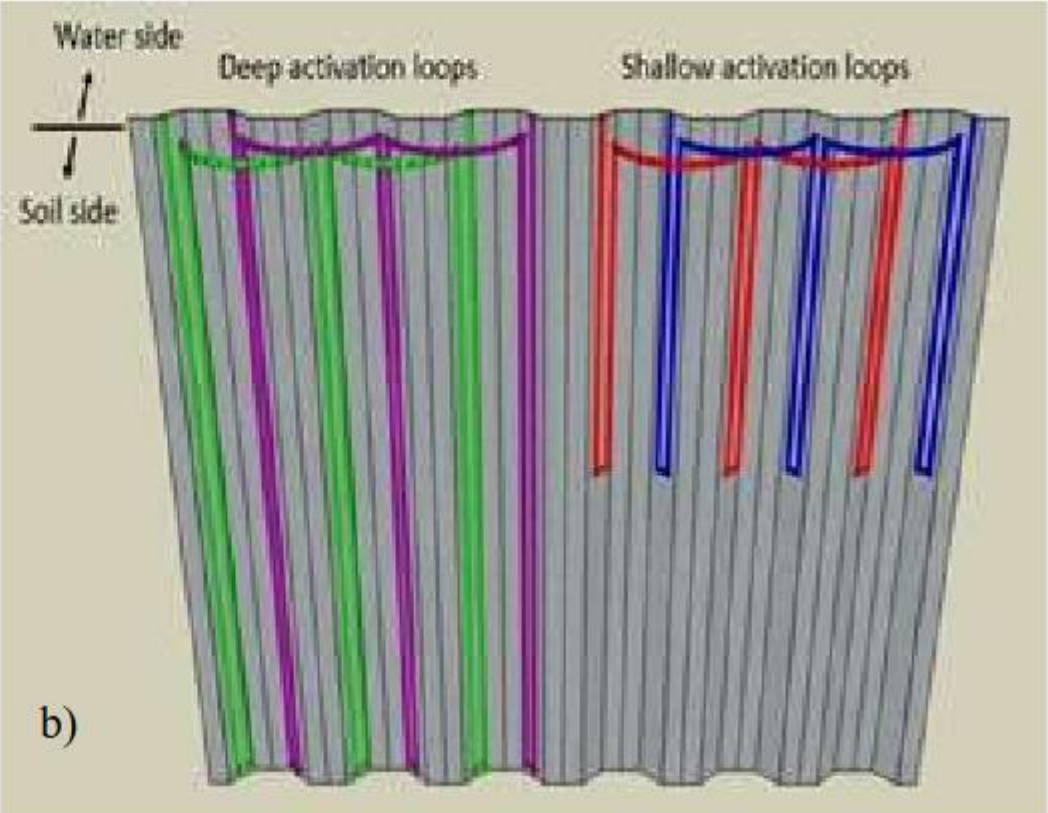
## **Finalità**

- 1-Garantire il supporto strutturale al terreno e/o alla sovrastruttura
- 2-Fornire energia utile per il riscaldamento o raffrescamento degli edifici limitrofi

Struttura installata a sostegno di una banchina fluviale in grado di **scambiare calore sia con il terreno circostante che con l'acqua superficiale.**

Le palancole metalliche sono in acciaio che è un materiale altamente conduttivo e in grado di migliorare scambio di calore rispetto al calcestruzzo.

# PALANCOLE TERMOATTIVE



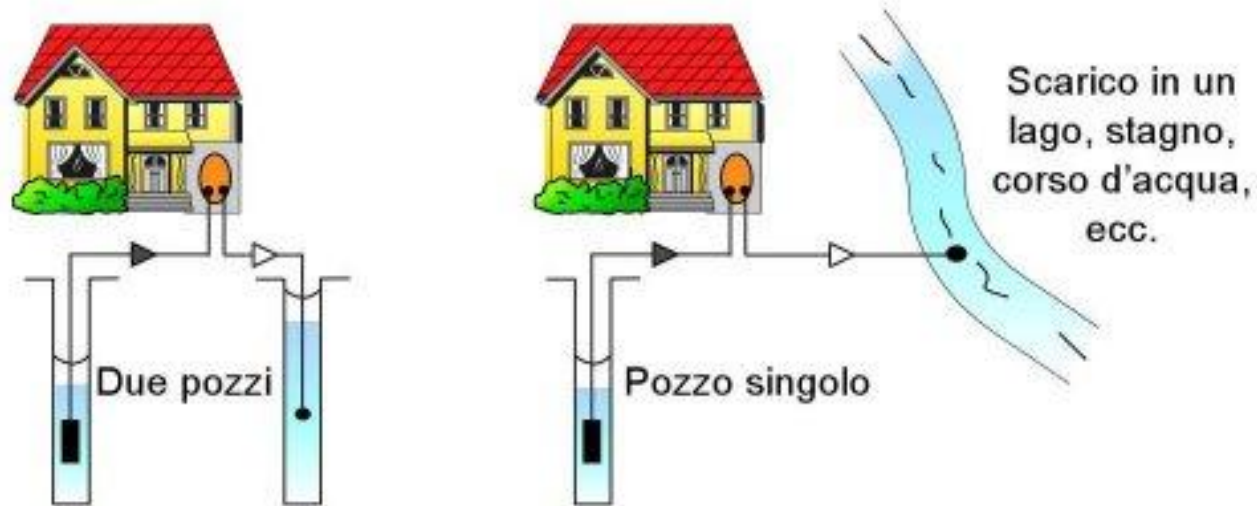
3 m  
(scambio  
con acqua)

15 m  
(scambio  
con suolo)

A-Palancola termoattiva con gli scambiatori di calore b) Loop superficiali e profondi installati con la palancola termoattiva (Gerola M., Cecinato F., Haasnoot J.K., Vardon P.J. 2022)

## 2-SISTEMI A CIRCUITO APERTO

Pompe di calore collegate ad acque sub-superficiali  
(sistemi a circuito aperto)



**Localizzazione**

**Dispositivi di utilizzo delle acque sotterranee**

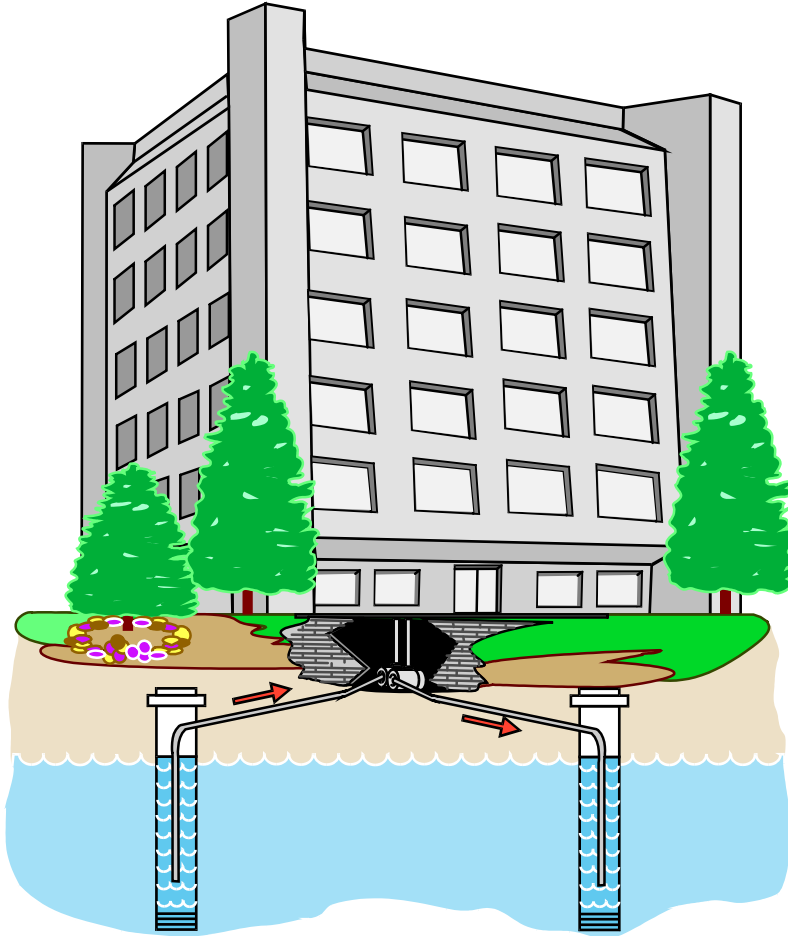
**Dimensionamenti**

**Impatto sui corpi idrici**

**Effetti idrodinamici**

**Effetti idrochimici**

# IMPIANTI A CIRCUITO APERTO



## Vantaggi

- Bassi costi iniziali
- Non richiesti spazi a disposizione
- Isolamento in scambiatore di calore a piastre

## Svantaggi

- Richiede manutenzione annuale allo scambiatore
- Esigenza di successivo recapito delle acque prelevate
- Utilizzo tipico per almeno 4 unità abitative

# DIRETTIVA 2000/60/EC DEL 23 OTTOBRE 2000

## Art. 11

.....

j) divieto di scarico diretto di inquinanti nelle acque sotterranee, fatte salve le disposizioni in appresso.

**Gli Stati membri possono autorizzare la reintroduzione nella medesima falda di acque utilizzate a scopi geotermici.** Essi possono autorizzare inoltre, a determinate condizioni:

.....

.....

-gli scarichi di piccoli quantitativi di sostanze finalizzati alla marcatura, alla protezione o al risanamento del corpo idrico, limitati al quantitativo strettamente necessario per le finalità in questione, purché tali scarichi non compromettano il conseguimento degli obiettivi ambientali fissati per il corpo idrico in questione;

# SCARICO DELLE ACQUE

**D.Lgs. 152/06**

**Art. 104 - SCARICHI NEL SOTTOSUOLO E NELLE ACQUE SOTTERRANEE**

1. È vietato lo scarico diretto nelle acque sotterranee e nel sottosuolo.
2. In deroga a quanto previsto al comma 1, l'autorità competente, dopo indagine preventiva, può autorizzare gli **scarichi nella stessa falda delle acque utilizzate per scopi geotermici**, delle acque di infiltrazione di miniere o cave o delle acque pompate nel corso di determinati lavori di ingegneria civile **ivi comprese quelle degli impianti di scambio termico.**

## **ELEMENTI PROGETTUALI**

- Tasso di riciclaggio R;
- Evoluzione e apertura del fronte termico;
- Tempo di apertura;
- Evoluzione termica nel pozzo di presa;
- Durata di vita dell'installazione;
- Impatto della coppia sulla pressione del serbatoio;
- Impatto della coppia sulle temperature: pennacchio termico;
- Evoluzione del pennacchio termico;
- Superamento di una soglia termica tollerata;
- Influenza della zona perturbata;
- Rigenerazione termica del serbatoio.

# LOCALIZZAZIONE SISTEMI A CIRCUITO APERTO

## Acquiferi

**Zone di ricarica e acquifero monostrato:** evitare per quanto possibile la realizzazione di perforazioni (sistemi a circuito aperto e chiuso); produrre una regolamentazione maggiormente vincolante (sulle caratteristiche delle captazioni, sulle portate, sulle modalità di restituzione delle acque, sui controlli...)

**Zone di deflusso e acquiferi multifalda:** limitare i sistemi a circuito aperto all'acquifero superficiale (compatibilmente con aspetti quali-quantitativi). Prescrivere particolari modalità di realizzazione per sistemi a circuito chiuso per evitare intercomunicazioni con falde profonde riservate ad uso potabile

# PRESCRIZIONI PROVINCIA DI MILANO, 2009

- Temperatura massima consentita per le acque di reimmissione pari a **20 °C**;
  - Assenza di variazione chimico-batteriologicala tra i valori misurati nell'acqua prelevata ed in quella scaricata;
  - Assenza di cortocircuitazione termica a breve o medio termine;
  - Verifica dell'ampiezza della bolla di calore nelle condizioni di esercizio;
  - Verifica delle deformazioni indotte localmente sulla falda e i possibili cedimenti o danni alle opere sovrastanti e/o circostanti.
  - Effettuazione di almeno una analisi all'anno sull'acqua di prelievo e di reimmissione, utilizzando, per analogia, i limiti tabellari dello scarico in corso d'acqua, opportunamente integrati con i seguenti parametri aggiuntivi:
    1. Escherichia coli, Enterococchi, Legionella sp., Carica batterica a 22°C e 37°C
    2. Carica micotica
    3. Solventi organoalogenati e BTEX
    4. Cromo esavalente
    5. pH
    6. Temperatura
    7. Conducibilità elettrolitica
    8. TOC
    9. Ossidabilità
- In casi particolari potrà essere richiesta la predisposizione di un vero e proprio sistema di monitoraggio qualitativo monte/valle, mediante la predisposizione di piezometri ad hoc.

# SCARICO DELLE ACQUE

## SCARICO IN ACQUE SUPERFICIALI

- Tab. 3 , All. 5 alla parte Terza del D.Lgs. 152/06: **variazione di temperatura al massimo di 3 °C tra monte e valle dello scarico nel corpo idrico**
- Valori da definire nel Piano di Tutela regionale

### ELEMENTI PROGETTUALI

- Descrizione dello schema di scarico;
- Portata media e di punta, durata di funzionamento prevista;
- Temperatura dello scarico e impatto sul recettore;
- Compatibilità chimico-fisica delle acque di scarico con quelle del corso d'acqua (classe di qualità);
- Eventuale scarico nel corso d'acqua dei prodotti di trattamento dell'acqua passante negli scambiatori nel corso d'acqua
- Portata media del corso d'acqua

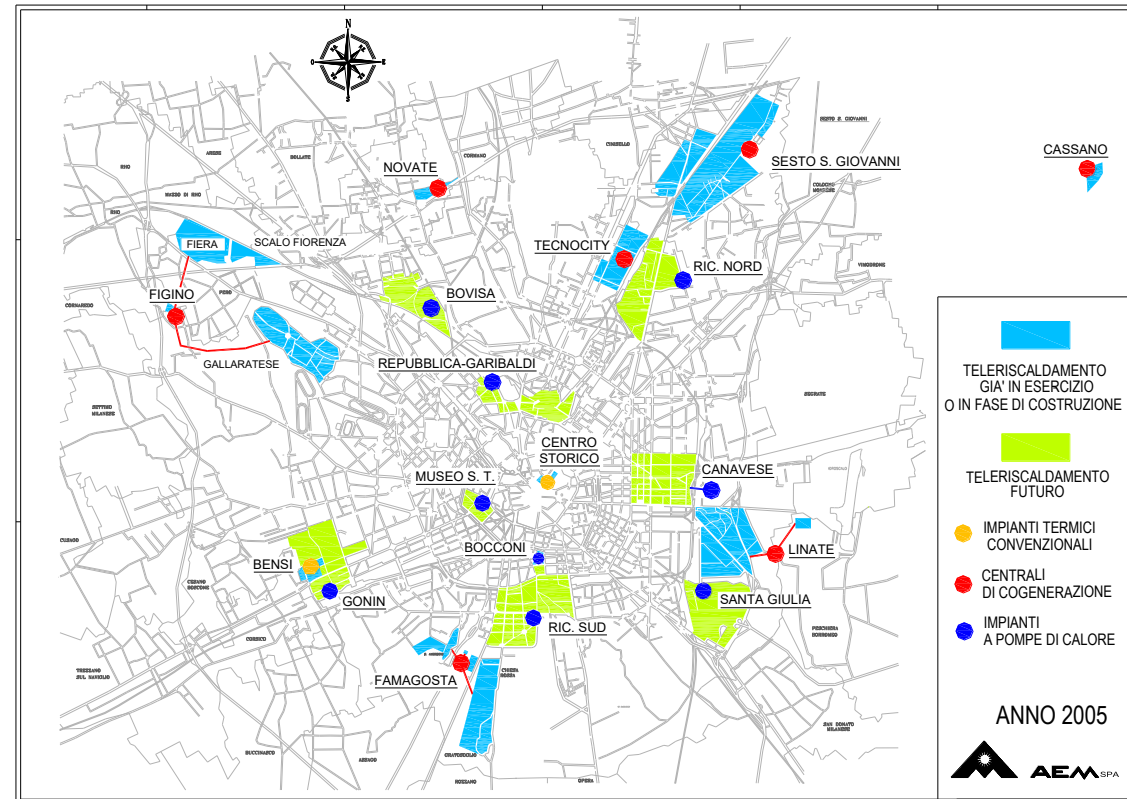
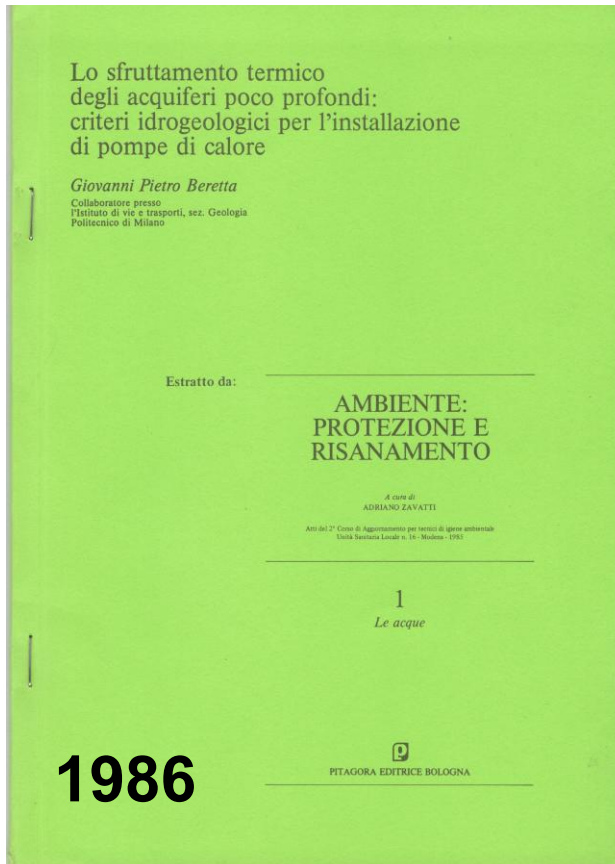
# SCARICO DELLE ACQUE

## SCARICO IN FOGNATURA (BIANCA O MISTA) ???

### **ELEMENTI PROGETTUALI**

- Descrizione dello schema di scarico;
- Portata media e di punta, durata di funzionamento prevista;
- Temperatura dello scarico e impatto sul recettore;
- Natura e caratteristiche della rete (separazione tra acque bianche e acque nere);
- Dimensionamento e adattamento della rete meteorica allo scarico
- Smaltimento supplementare, in particolare durante eventi critici;
- Accordo con l'ente gestore per l'accettabilità del carico idraulico.

# ENERGIA GEOTERMICA BASSA ENTALPIA



## Progetti di pompe di calore a circuito aperto a Milano (da A2A)

- BERETTA G.P., COPPOLA G., DELLA PONA L. (2014) – Solute and heat transport in groundwater similarity: Model application of a high capacity open-loop pump. *Geothermics* 51 (2014), 63-70
- BERETTA G.P. (2017) - Groundwater recharge through wells in open loop geothermal system: problems and solutions - part 1. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater* (2017) - AS21-263: 41 – 54, DOI 10.7343/as-2017-263
- BERETTA G.P.: (2017) - Groundwater recharge through wells in open loop geothermal system: problems and solutions - part 2. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater* (2017) - AS21-264: 55 – 62, DOI 10.7343/as-2017-264

**1984**

BERETTA G.P. (1984) - Condizioni idrogeologiche per lo sfruttamento degli acquiferi poco profondi mediante pompe di calore. Ingegneria Ambientale, vol. 13, n. 9, settembre, Milano

BERETTA G.P. (1986) - Lo sfruttamento termico degli acquiferi poco profondi: criteri idrogeologici per l'installazione di pompe di calore. Ambiente: Protezione e Risanamento - Vol. 1: Le Acque, Pitagora Editrice, Bologna

BERETTA G.P., COPPOLA G., DELLA PONA L. (2014) – Solute and heat transport in groundwater similarity: Model application of a high capacity open-loop pump. Geothermics 51 (2014), 63-70

BERETTA G.P. (2017) - Groundwater recharge through wells in open loop geothermal system: problems and solutions - part 1. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater (2017) - AS21-263: 41 – 54, DOI 10.7343/as-2017-

BERETTA G.P. (2017) - Groundwater recharge through wells in open loop geothermal system: problems and solutions - part 2. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater (2017) - AS21-264: 55 – 62, DOI 10.7343/as-2017-264

**Come funziona il sistema**



**Modellazione analitica**



**Modellazione numerica**



**Modellazione operativa**



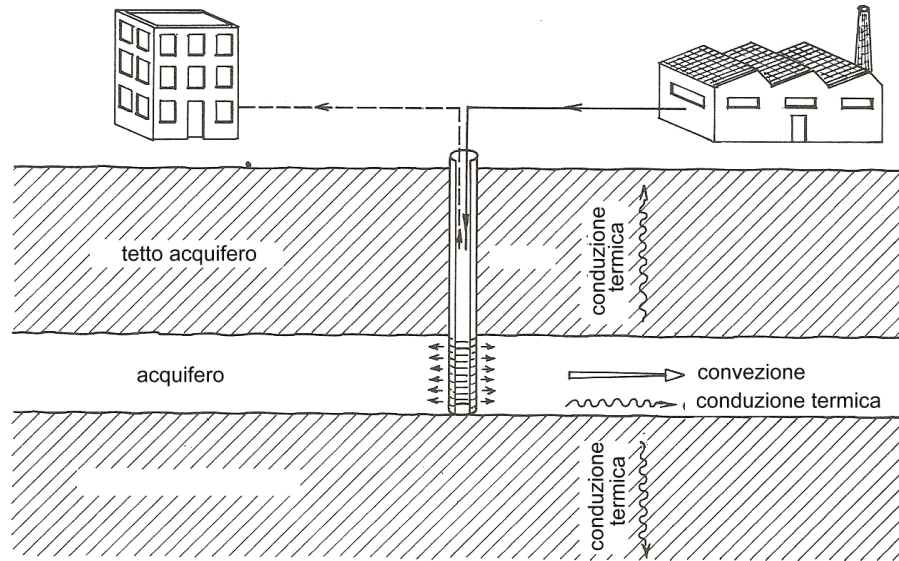
**2026....**

# FATTIBILITÀ DELLO SFRUTTAMENTO ENERGETICO DEGLI ACQUIFERI POCO PROFONDI MEDIANTE POMPE DI CALORE

Produttività (m <sup>3</sup> /h)	Fattori di economicità			Zonazione
	Profondità pozzi (m)	Soggiacenza falda (m)	Equipaggiamento pozzi	
>50 (>14 L/s)	<50	<10	Normale	A – molto favorevole*
>50 (>14 L/s)	>50	>10	Speciale	B – favorevole
10-50 (3-14 L/s)	<50	<10	Normale	C - mediamente favorevole*
10-50 (3-14 L/s)	>50	>10	Speciale	D- poco favorevole
<10 (< 3 L/s)				E – sfavorevole

(\* condizione da valutare localmente in relazione alle possibili limitazioni delle operazioni di reiniezione: sollevamento della falda ed interferenza con manufatti o impaludamento dell'area

# DISPOSITIVI DI UTILIZZO DELLE ACQUE SOTTERRANEE



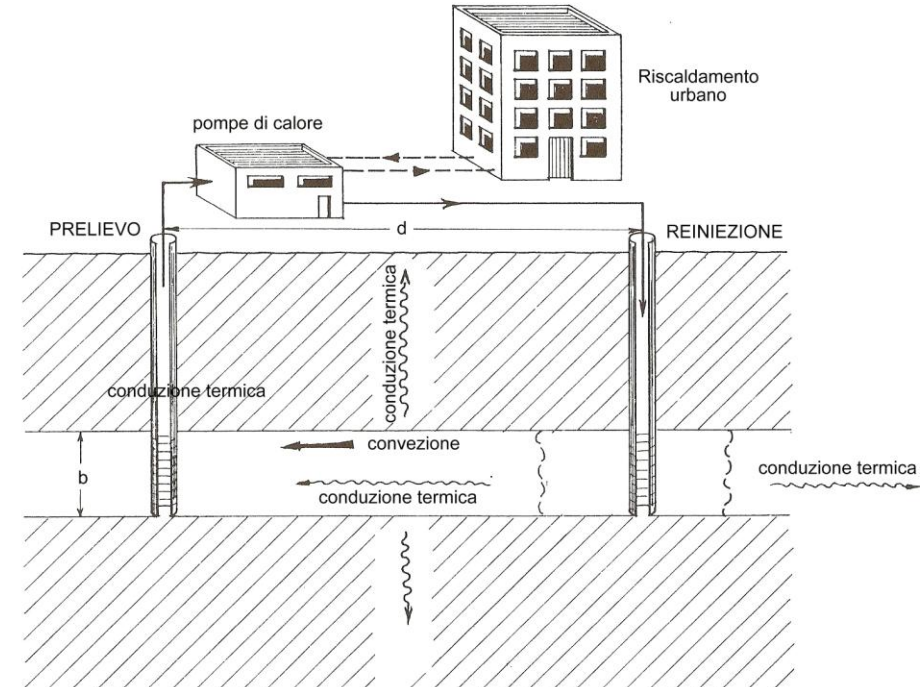
## Pozzo unico

Lo schema di utilizzo è costituito da un unico pozzo che, a seconda dei periodi dell'anno, è in comunicazione con una unità di produzione di calore o con una di recupero; le due fasi sono separate da un periodo di pausa.

## Coppia di pozzi

Il sistema è costituito da una coppia di pozzi che soddisfa alle esigenze di riscaldamento invernale e condizionamento estivo.

Un pozzo preleva l'acqua e l'altro la inietta ad una distanza superiore a qualche decina di metri; in 4 mesi autunnali-invernali si consumano le calorie e in 4 mesi primaverili-estivi le frigorifiche, essendo separati alternativamente da 2 mesi di pausa.



# POSSIBILI DISPOSITIVI TIPOLOGIE DI COPPIE DI POZZI

## 1) Pozzi a destinazione fissa

**Un pozzo viene destinato esclusivamente alla reiniezione e l'altro al prelievo di acque.** Si iniettano pertanto volumi di acqua calda e fredda nello stesso pozzo, ma in tempi differenti. E' necessario calcolare la distanza tra le opere di captazione e la portata d'utilizzo in modo tale che la temperatura sia in fase con la domanda di riscaldamento o condizionamento.

## 2) Pozzi a destinazione alterna

**Si impiega un pozzo alternativamente in pompaggio o in ricarica;** d'inverno si pompa acqua dal pozzo dove d'estate la si inietta calda.

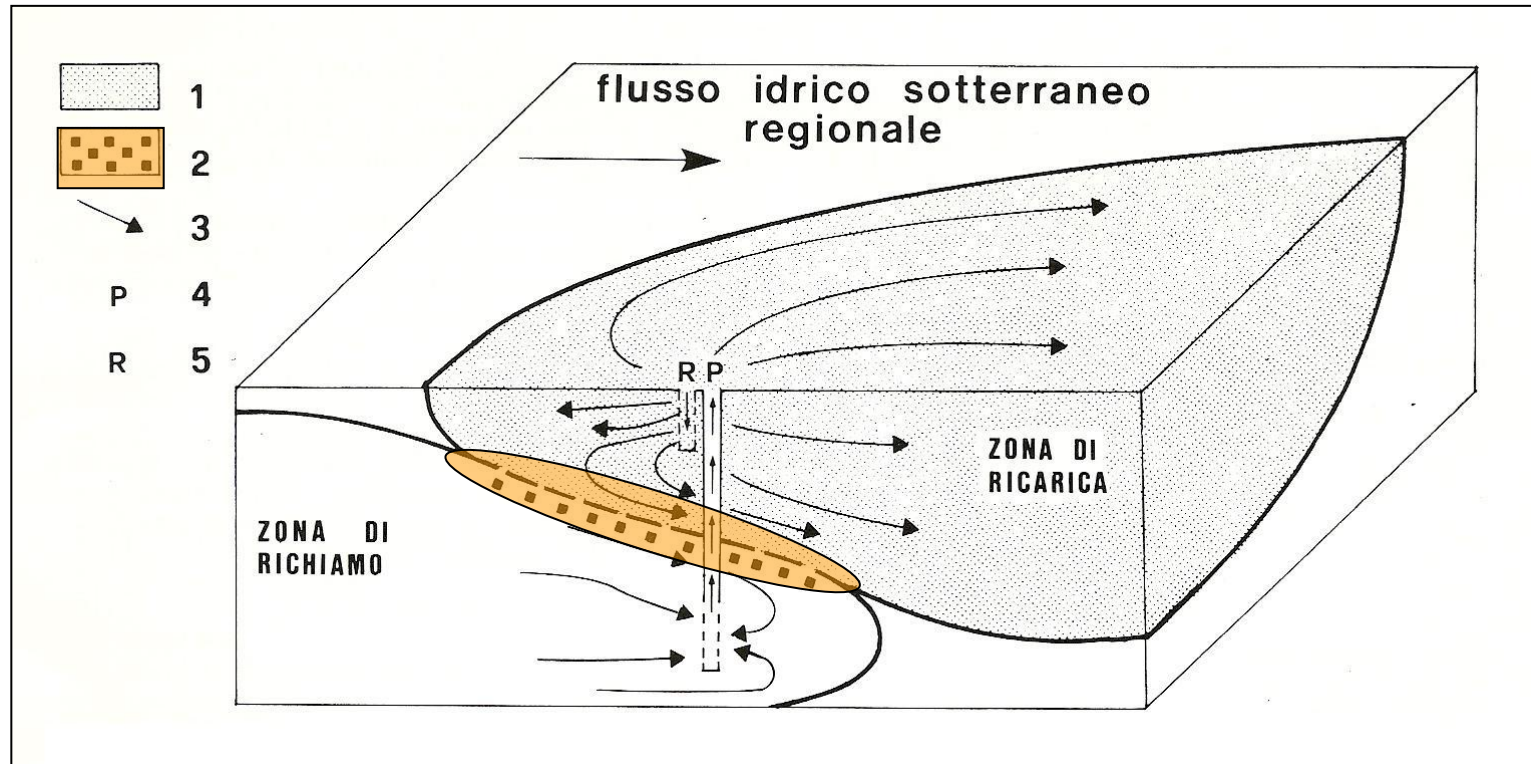
Questo sistema garantisce numerosi vantaggi costituiti dalla possibilità di evitare il riciclaggio, l'immediata disponibilità delle temperature ottimali, temperatura di produzione non impattata dall'iniezione di acque e scarso allontanamento delle acque calde immagazzinate.

Lo svantaggio è costituito dalla necessità di disporre di due tubazioni di mandata in ogni pozzo (prelievo e iniezione di acqua).

### 3) Pozzi anisotropi

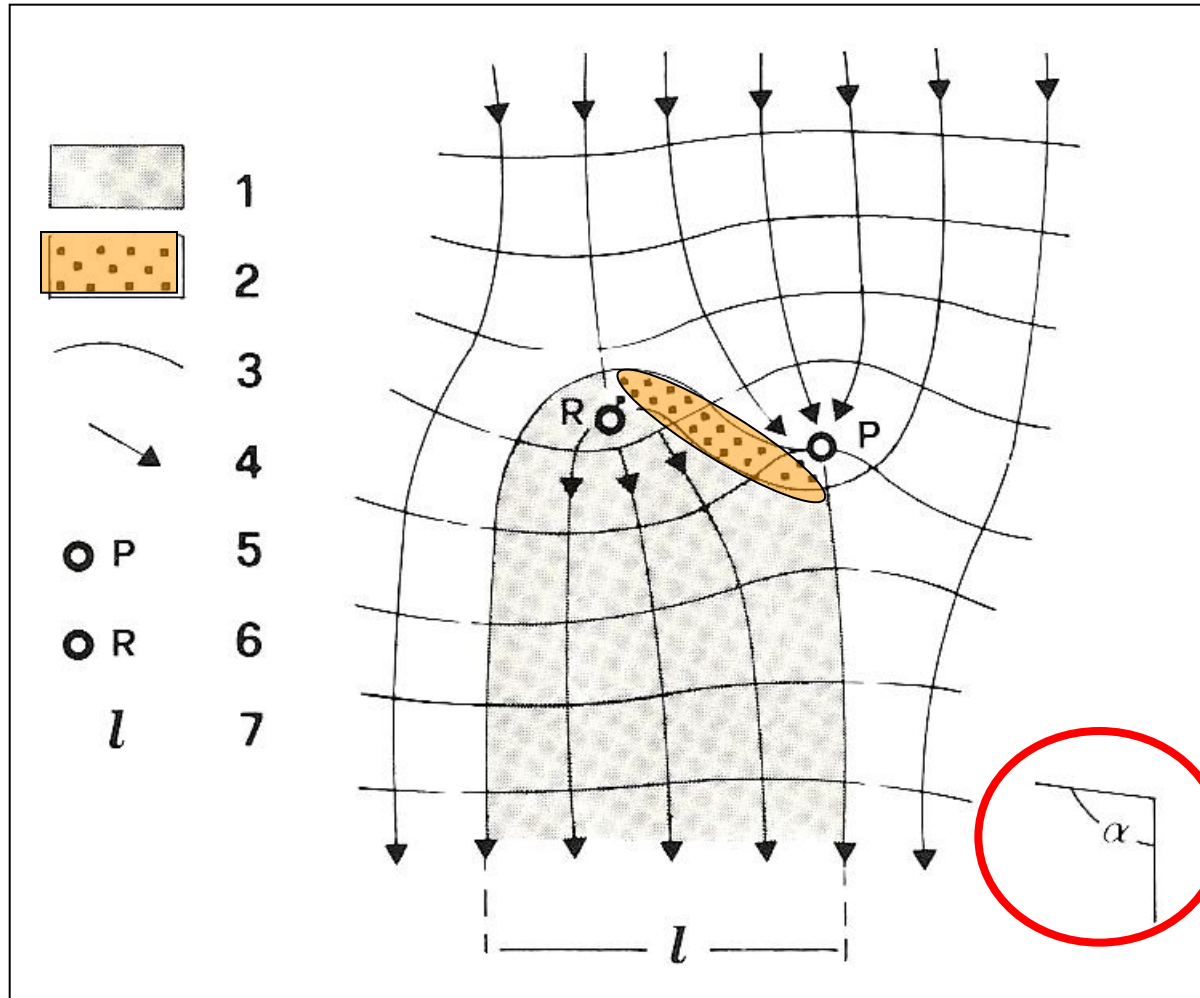
**Il sistema è costituito da due pozzi a diversa profondità nell'ambito della parte superiore ed inferiore dello stesso acquifero.**

L'acqua viene pompata dall'orizzonte profondo e scaricata in quello superficiale per ridurre il riciclaggio e per ragioni sanitarie.



1- zona interessata dalla ricarica del pozzo (fronte termico), 2- zona di riciclaggio.  
3- linea di flusso. 4- pozzo di prelievo, 5- pozzo di reiniezione

# SCHEMA DELLE MODIFICAZIONI DEL RETICOLO DI FLUSSO IN UNA COPPIA DI POZZI (PRESA-RESA)



- 1-zona interessata dalla ricarica del pozzo
- 2- zona di riciclaggio
- 3- isopiezometriche
- 4- linee di flusso
- 5- pozzo di prelievo P**
- 6- pozzo di ricarica R**
- 7- larghezza del fronte termico

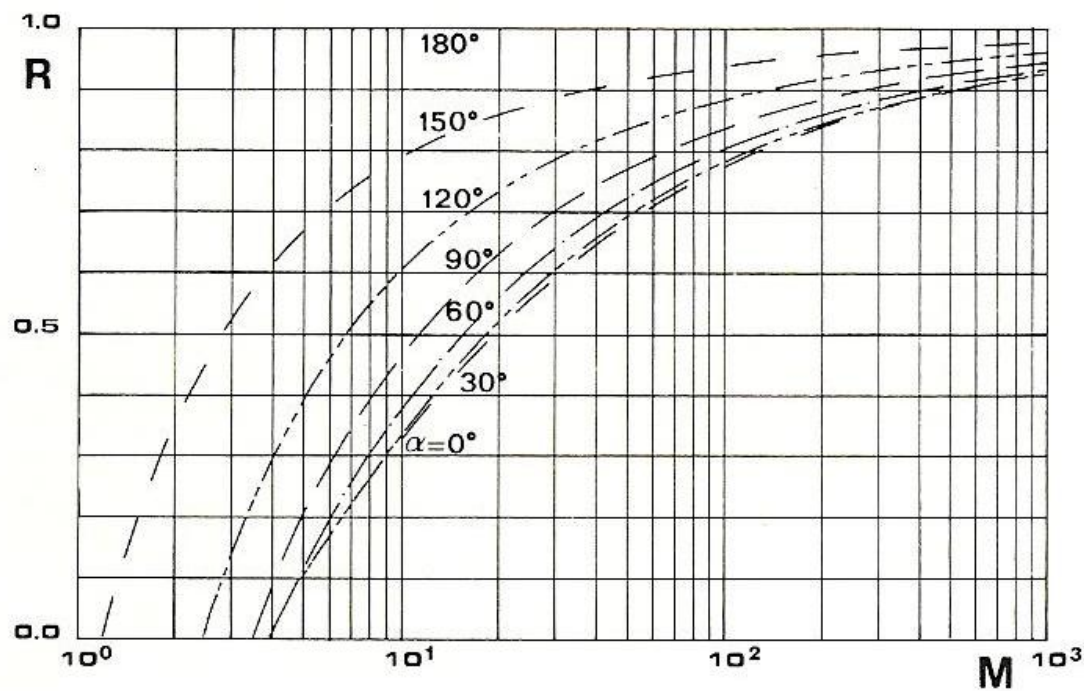


Diagramma per il calcolo del tasso di riciclaggio **R** in funzione di **M** ed  $\alpha$

$$M = 2Q / b d v$$

Q=portata pozzo (m<sup>3</sup>/s)

b= spessore dell'acquifero (m)

d= distanza tra i pozzi (m)

v=velocità di filtrazione (m/s)

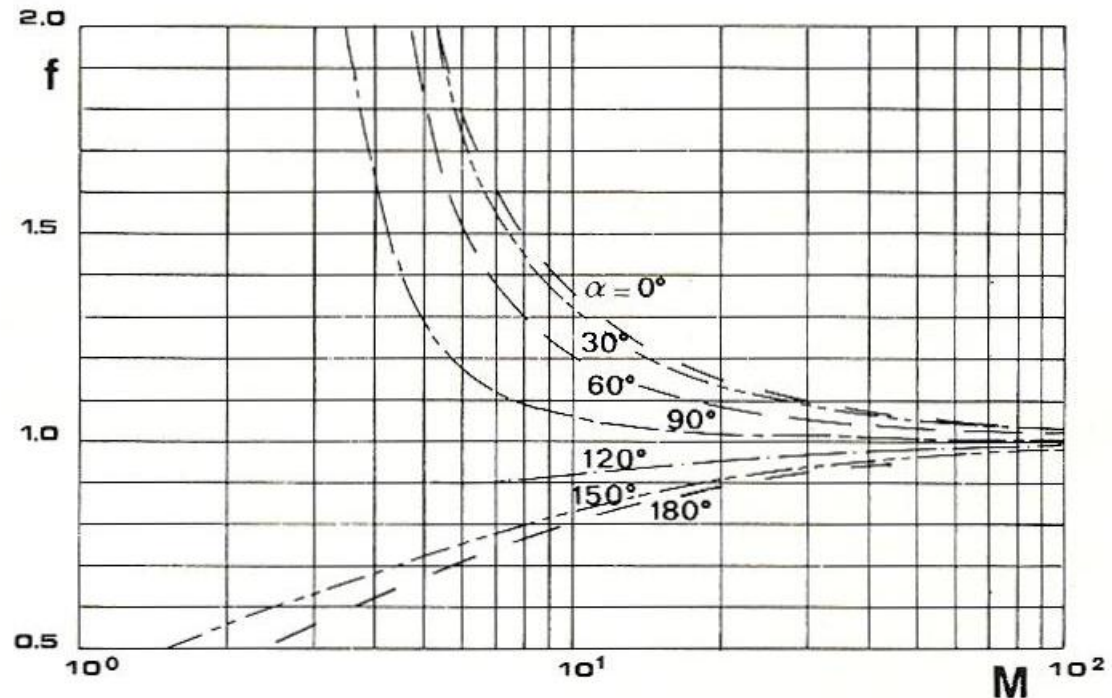
$\alpha$ = angolo tra congiungente pozzi

(orientamento dal pozzo di presa verso quello di resa) e direzione di flusso idrico sotterraneo

$$t_v = \frac{\pi c_a d^2 b}{3 c_w Q} f$$

$t_v$ = tempo dall'inizio sfruttamento (s)  
 $c_a, c_w$  = capacità termica dell'acquifero e dell'acqua (cal m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

Diagramma per il calcolo del fattore di modificazione delle variazioni termiche **f** in funzione di **M** ed  $\alpha$



# TIPOLOGIA DI DISPOSITIVI IN RELAZIONE ALLE CARATTERISTICHE DEL FLUSSO IDRICO SOTTERRANEO

Caratteristiche idrogeologiche	Zone con flusso idrico sotterraneo debole		Zone con flusso idrico sotterraneo elevato
Tipologia di installazione	<b>1) Pozzi a destinazione alterna</b>	<b>2) Pozzi a destinazione fissa</b>	<b>3) Pozzi anisotropi</b>
Ubicazione	Aree urbanizzate, presenza di altri prelievi idrici		Località con <b>terreni di proprietà non estesi per rispettare <math>d &lt; 2Q/(bv)</math></b>
Considerazioni termiche	Abbinamento ad impianti di sfruttamento energia solare per accumulo calore nel sottosuolo	Creazione di “bolle” stagionali di acqua calda e fredda invertendo il ruolo delle captazioni	In queste condizioni le “bolle” si spostano molto potendo essere sfruttate a valle da un altro utente (1) e non restano sul posto (2)
Rendimento	50 % (acquiferi alternativamente caldi e freddi)	50% (bolle praticamente ferme e minori dispersioni termiche)	Necessità di conoscere stratigrafia e anisotropia acquifero per minimizzare riciclaggio acque

# RICICLAGGIO DELLA ACQUE IN RELAZIONE AI PARAMETRI IDROGEOLOGICI

(spessore  $b$  e velocità darciana  $v$ )

## E DELLA COPPIA DI POZZI

(portata  $Q$  e angolo  $\alpha$  formato tra la congiungente i pozzi e la direzione di flusso idrico sotterraneo)

$$M = \frac{2Q}{bdv}$$

Valore di $M$	Entità del riciclaggio	Angolo-obiettivo
$M < 1$	Assenza di riciclaggio	$\alpha < 100^\circ$
$1 < M < 2$	Minimizzabile	$\alpha = \arccos (M/2)$
$M > 2$	Esistente ma con possibile riduzione	$\alpha = 0^\circ$

# SIMILITUDINE TRA EQUAZIONE DEL TRASPORTO DEI SOLUTI E DEL TRASPORTO DEL CALORE

$$R \frac{\partial U}{\partial t} = -v_t \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\lambda}{\theta c_w \rho_w} \delta_{ij} \frac{\partial U}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ D_{ij} \frac{\partial U}{\partial x_j} \right]$$

**TRASPORTO DEL CALORE**

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = -u_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ D_m \delta_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right]$$

**TRASPORTO DEI SOLUTI**

Convezione termica ↔ Avvezione

Conduzione termica ↔ Diffusione molecolare

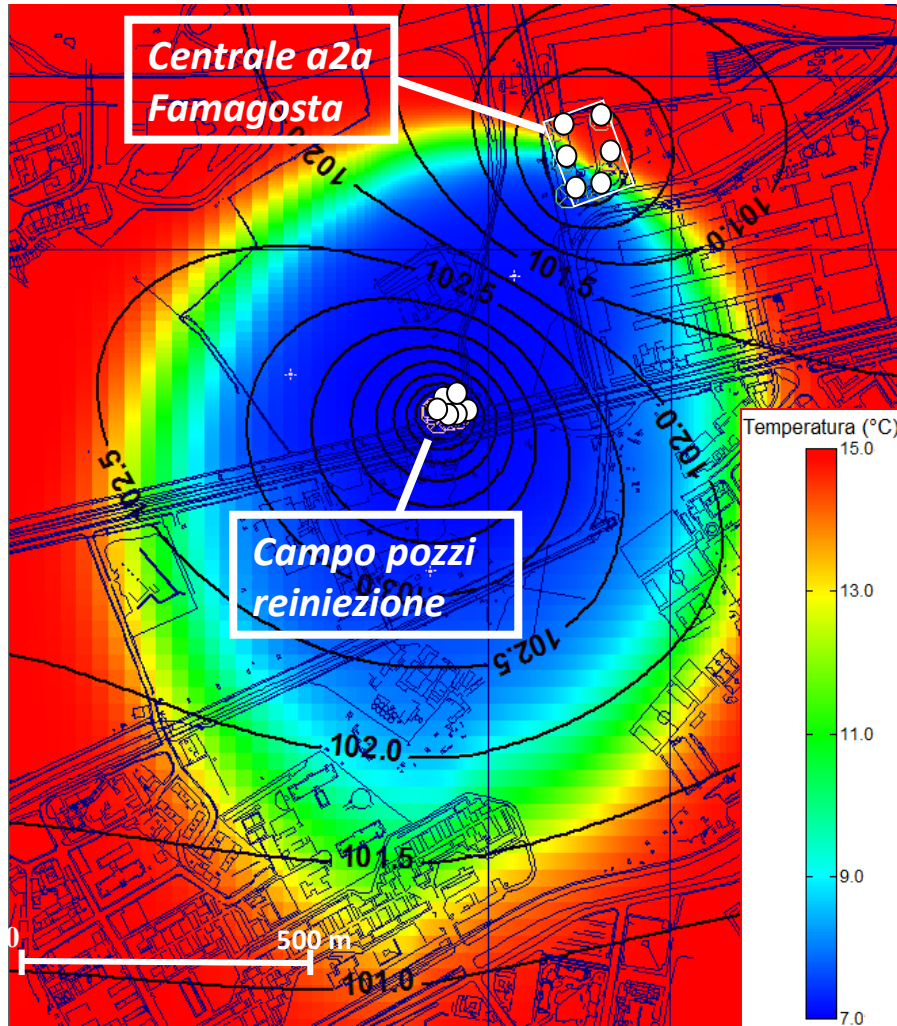
Dispersione termica ↔ Dispersione idrodinamica

Ritardo termico ↔ Ritardo per Adsorbimento

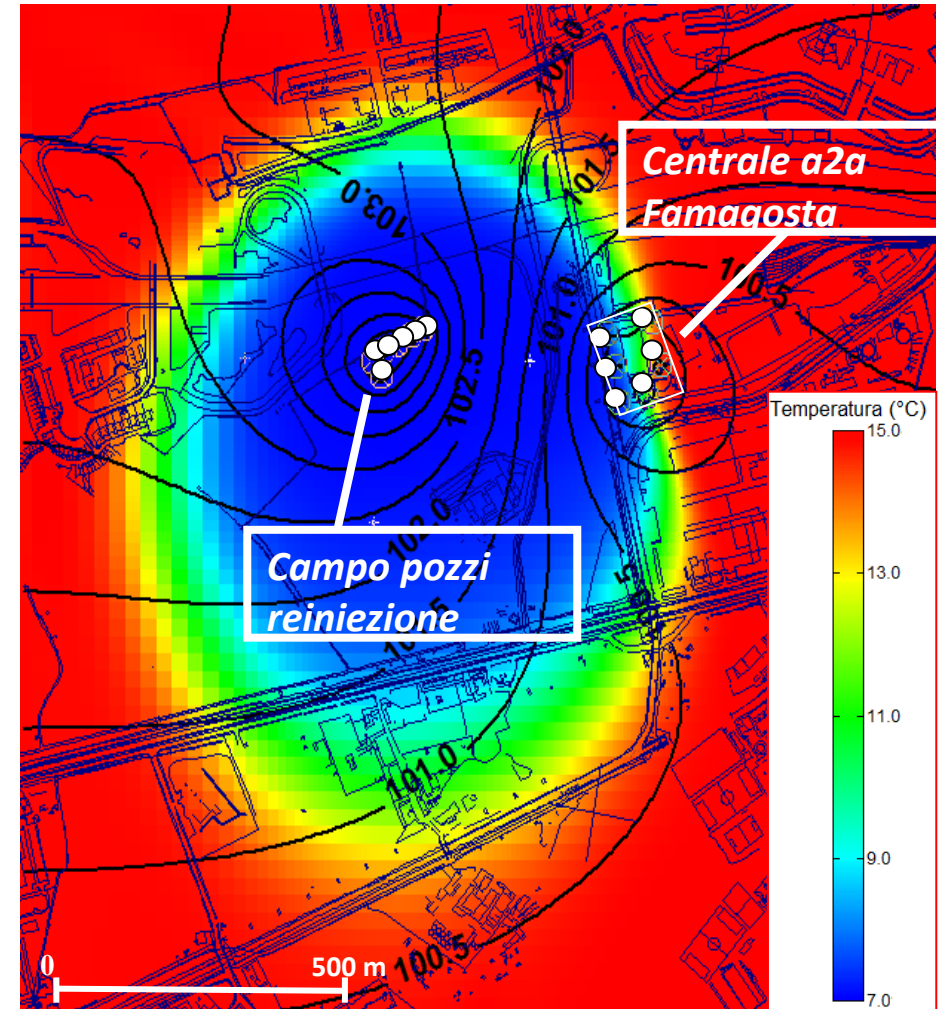


**Utilizzo di codici numerici  
MODFLOW e MT3D**

# CENTRALE FAMAGOSTA (MILANO) – a2a MODELLO DI INTERFERENZA TERMICA

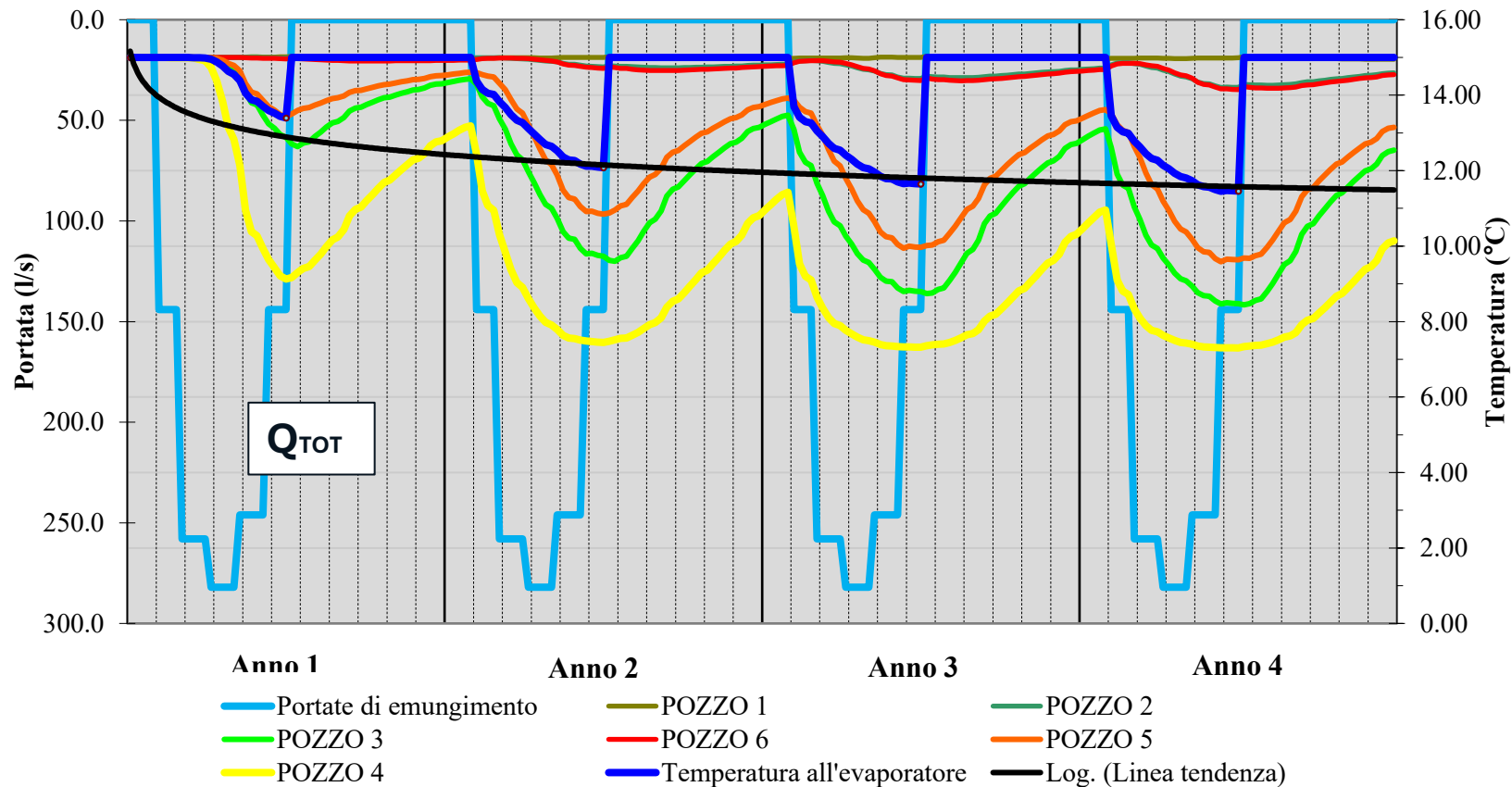


**Soluzione 1 – Anno 4**



**Soluzione 2 – Anno 4**

# PREVISIONE ANDAMENTO NEL TEMPO DELLA PERTURBAZIONE TERMICA *soluzione 1*



Dopo 4 anni la temperatura tende a stabilizzarsi verso un valore di **11.5 °C**

# EFFETTI DEL CIRCUITO APERTO SULLE ACQUE SOTTERRANEE

## Rischio idraulico e termico

### Diminuzione del potenziale idraulico e termico

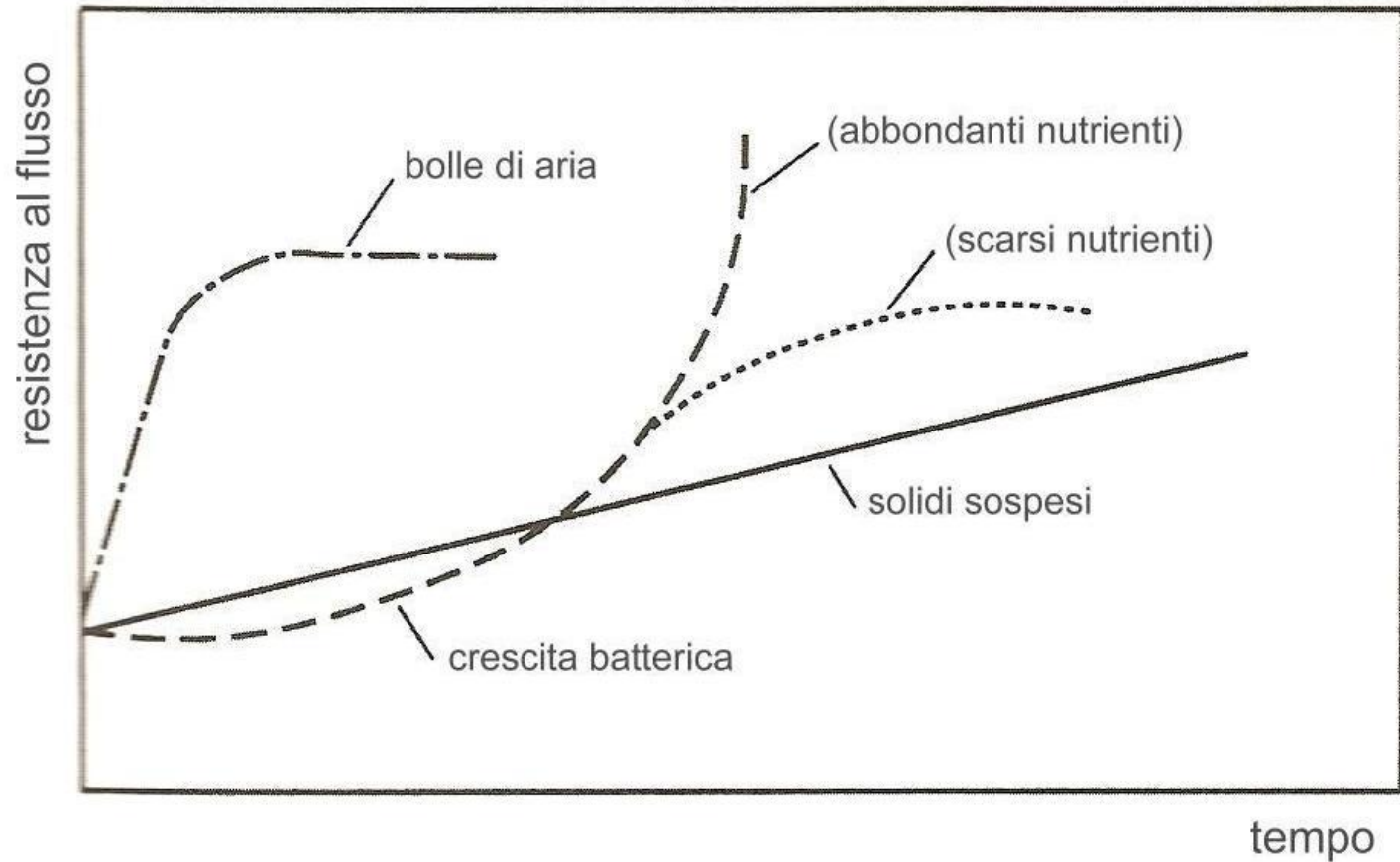
- a) Una moltiplicazione in modo non regolamentato delle pompe di calore a circuito aperto che utilizzano le risorse geotermiche a bassa entalpia può determinare condizioni di sovrasfruttamento.
- b) Tale condizione si verifica quando esiste un significativo riciclaggio di acque tra le diverse coppie di pozzi, anche perché l'attuale assenza di vincoli determina la possibilità che un'opera venga costruita a monte di un'altra già esistente, compromettendone l'efficienza.

# RISCHIO IDRAULICO

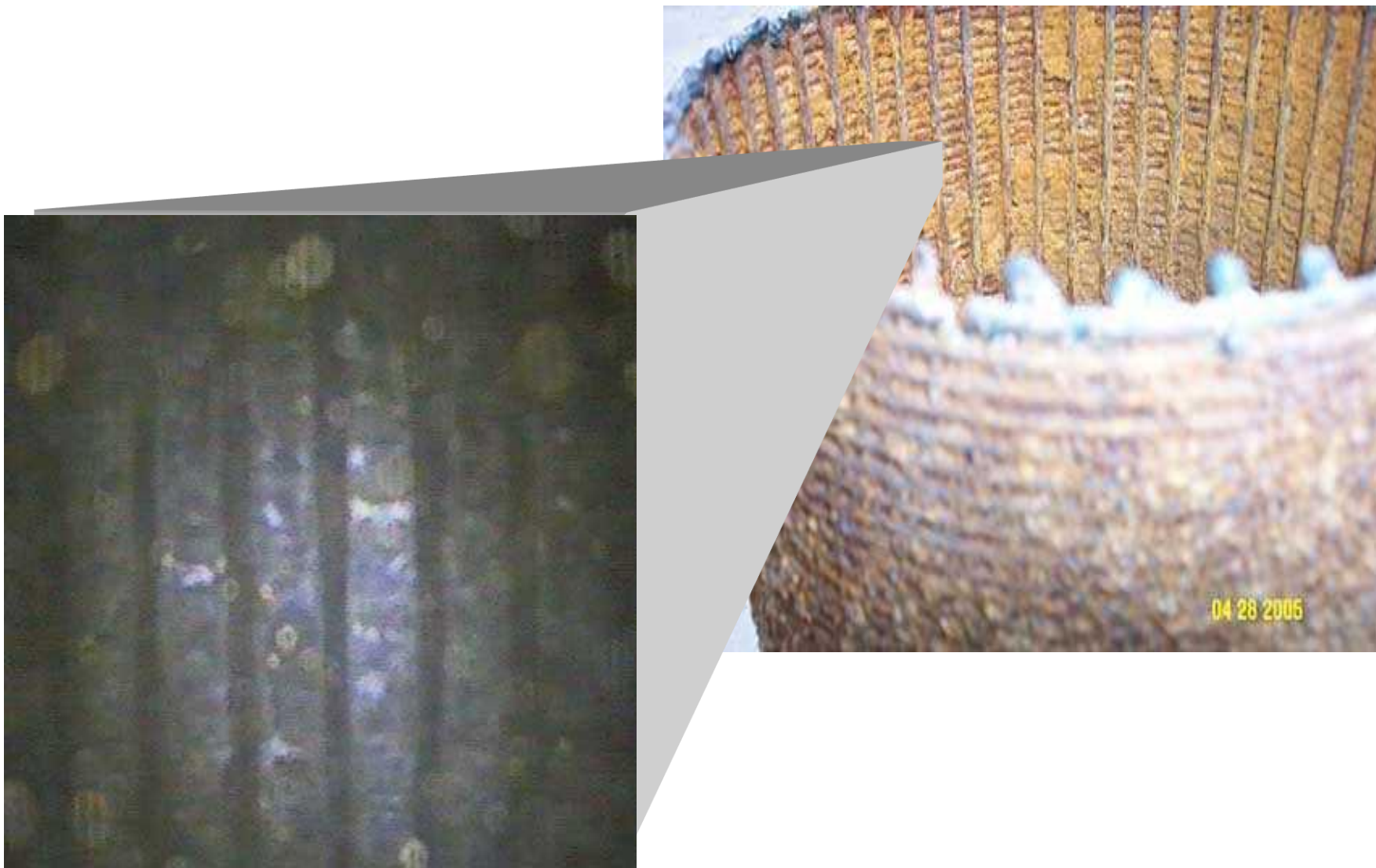
## Effetti sull'efficienza dei pozzi

- a) la presenza di bolle di gas nelle opere di ricarica che hanno lo stesso effetto delle particelle argillose in quanto impediscono il passaggio dell'acqua negli interstizi (opportuna realizzazione del doppio di pozzi di resa rispetto a quelli di presa).
- b) la presenza di solidi in sospensione (minerali argillosi in dispersione colloidale) provoca una diminuzione della portata di iniezione che è direttamente proporzionale alla quantità di tali solidi in quanto essi diminuiscono la permeabilità del terreno.
- c) l'interazione chimica per una precipitazione di metalli e di prodotti di ossido-riduzione sotto forma di sostanze insolubili in seguito alla interazione tra acque di falda e quelle di ricarica.
- d) la crescita di formazioni algali che intasano i filtri dei pozzi.

**SCHEMA DELL'EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA RESISTENZA AL FLUSSO  
CAUSATA DA INTASAMENTO DEI FILTRI DI UN POZZO PER ACQUA  
(R.D.G. Pyne, 2005)**



## Esempio di filtri di pozzi occlusi da ferrobatteri



# RISCHIO CHIMICO

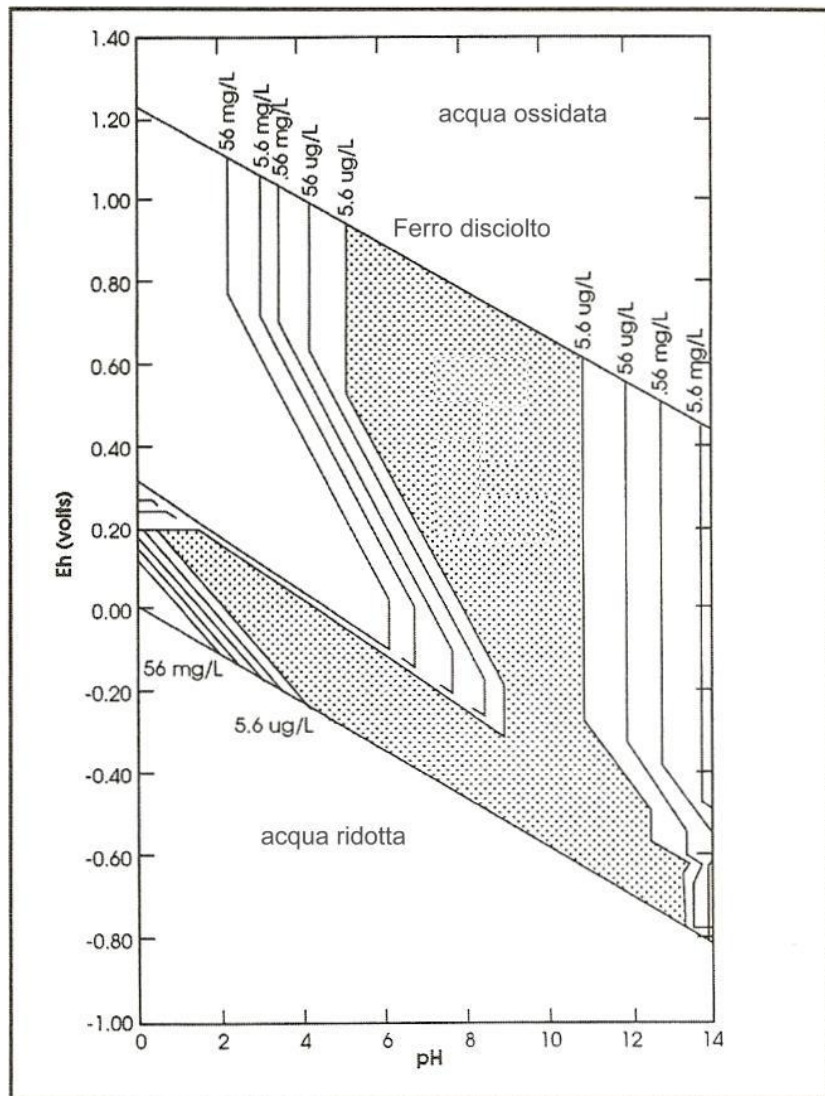
## Effetti sulla qualità delle acque: reazioni chimico-fisiche-biologiche

- a) Il pH diminuisce quando la temperatura aumenta. Il diminuire del pH determina un incremento della concentrazione di metalli.
- b) La solubilità di molte sostanze, descritta dal prodotto di solubilità, aumenta con l'incremento di temperatura e quindi si avrà una maggiore dissoluzione di alcuni sali, ad eccezione dei carbonati che sono meno solubili a temperature più elevate
- c) La diminuzione della concentrazione di Ossigeno dovuta all'aumento della temperatura produce una diminuzione del potenziale redox e quindi può determinare condizioni più ridotte; al contrario quando la temperatura aumenta sono diminuite le ossidazioni.
- d) Quando la temperatura, il pH, l'Eh o il contenuto salino di un'acqua variano, i microrganismi modificano il loro metabolismo. Un aumento della temperatura provoca la diminuzione dell'Ossigeno disciolto e quindi la messa in soluzione di metalli pesanti (che ostacolano la crescita microbica); d'altra parte l'aumento della temperatura favorisce la decomposizione delle sostanze organiche utilizzate dai microrganismi nel loro metabolismo

# EFFETTI SULLA QUALITÀ DELLE ACQUE

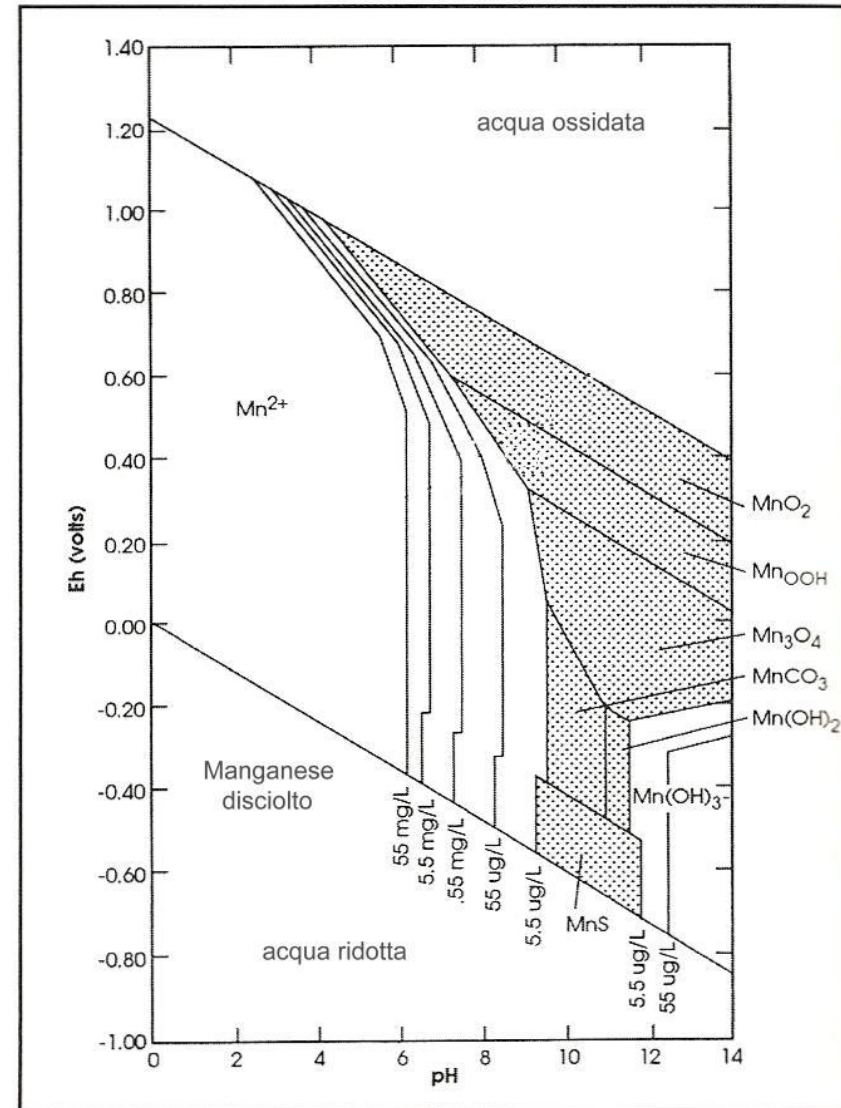
## FENOMENI IDRODINAMICI E IDROCHIMICI

- a) L'utilizzo stagionale degli impianti provoca l'insorgere di incrostazioni algali e batteriche oltre che la presenza di gel di idrossidi, dovuti ad una imperfetta chiusura delle testate dei pozzi e alla riduzione del flusso idrico intorno alle opere di captazione
- b) Soluzione di inquinanti contenuti negli orizzonti superficiali questo porta, a seconda dei casi, alla corrosione del manufatto o alla colmatazione dei tratti fenestrati, riducendone la potenzialità e rendendolo inservibile.
- c) Se la testata dei pozzi non è perfettamente chiusa, le acque di ruscellamento e le polveri possono causare sviluppo di alghe e batteri. La proliferazione di questi microrganismi (pur sempre contrastabile con ipoclorito, ma con rischi d'inquinamento) è inoltre favorita quando le acque di reiniezione siano più calde di quelle della falda (ad esempio nel periodo estivo), provocando intasamento dei filtri e dei problemi di corrosione.
- d) per le variazioni termiche indotte si può avere liberazione di ioni Ferro ed Manganese e la precipitazione dei carbonati che, depositandosi tra i granuli, riducono la permeabilità dell'acquifero. Inoltre la corrosione delle parti metalliche di cui sono dotati gli impianti di captazione e ricarica può portare alla messa in circolo di altri metalli come Piombo, Rame e Zinco.



Condizioni di equilibrio del **Ferro**

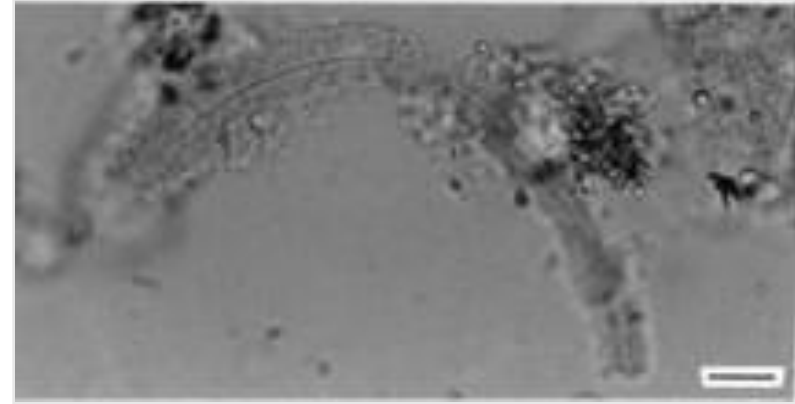
## Condizioni di equilibrio del **Manganese**



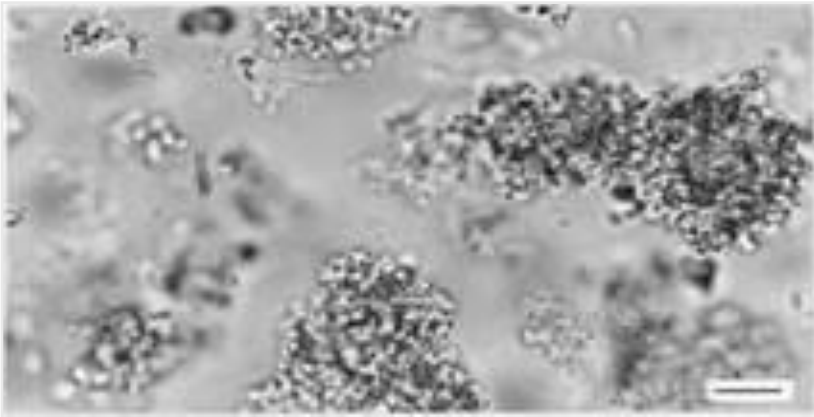
## Batteri che favoriscono la precipitazione di Ferro e Manganese nei pozzi



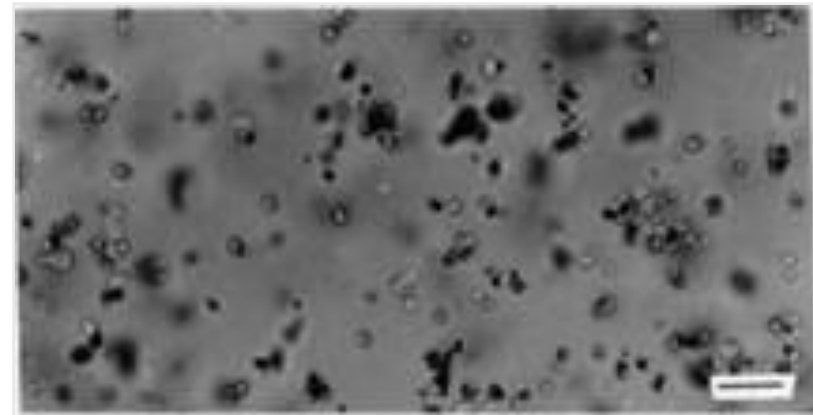
*Gallionella ferruginea*



*Leptothrix cholodnii*

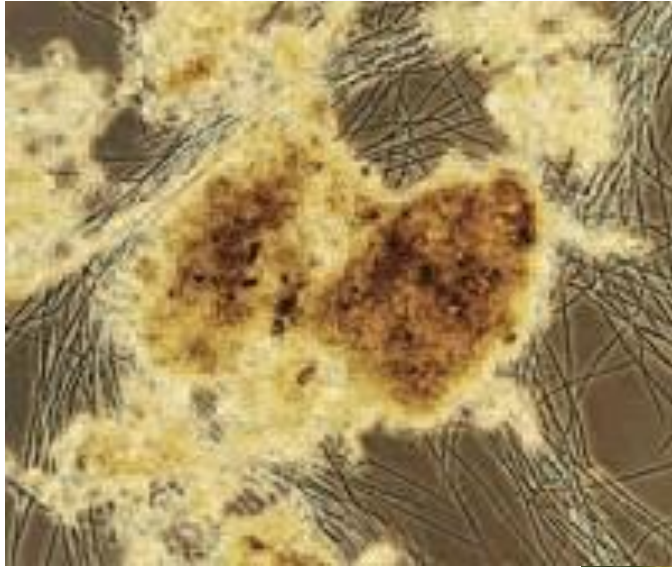


*Thiobacillus*

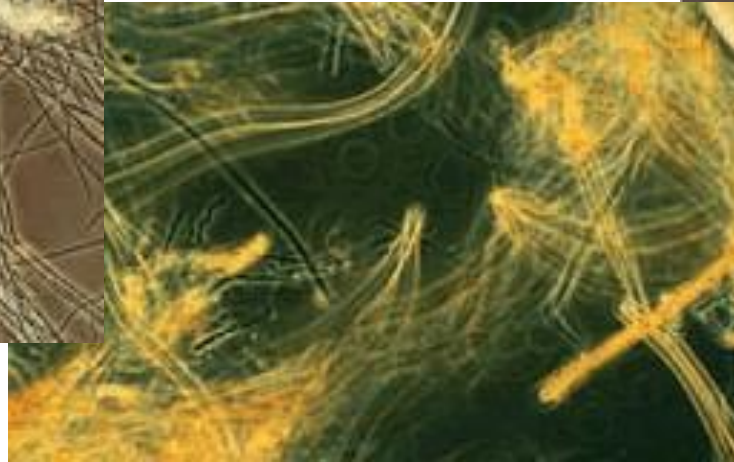


*Siderococcus*

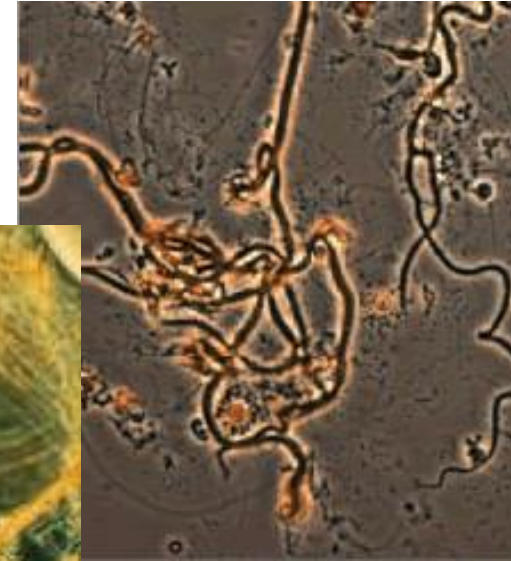
# Ferrobatteri (specie che utilizzano Ferro, Manganese e solfati)



**Sphaerotilus**



**Leptohrix**



**Galionella  
Ferruginea**

**E-Coli**

Possono favorire la  
crescita di  
microrganismi  
patogeni



# IMPATTO SUI CORPI IDRICI

**D.Lgs. 152/06**

**Art. 104 - SCARICHI NEL SOTTOSUOLO E NELLE ACQUE SOTTERRANEE**

1. È vietato lo scarico diretto nelle acque sotterranee e nel sottosuolo.
2. In deroga a quanto previsto al comma 1, l'autorità competente, dopo indagine preventiva, può **autorizzare gli scarichi nella stessa falda delle acque utilizzate per scopi geotermici**, delle acque di infiltrazione di miniere o cave o delle acque pompate nel corso di determinati lavori di ingegneria civile, **ivi comprese quelle degli impianti di scambio termico.**

# SCARICO IN ACQUE SOTTERRANEE

- Stima portata di reiniezione media e di punta, dura di funzionamento prevista
- Numero di opere da realizzare;
- Valutazione dell'**innalzamento del livello della falda** in relazione alla presenza di fabbricati interrati limitrofi;
- Impatto sulla qualità delle acque in caso di trattamento delle acque con prodotti chimici anticorrosione e battericidi (prodotti in uso per acque potabili);
- Misure intraprese per evitare lo sviluppo di batteri nella rete di superficie prima della reiniezione (in particolare eliminazione unti bassi di ristagno);
- Temperatura della reiniezione e impatto termico sulla falda e sulle **captazioni vicine (diminuzione della resa termica degli impianti)**;
- Distanza tra pozzo di presa e di resa;
- Orientazione della coppia in relazione alla direzione di flusso idrico sotterraneo.

## **DATI SUPPLEMENTARI**

- Tasso di riciclaggio R;
- Evoluzione e apertura del fronte termico;
- Tempo di apertura;
- Evoluzione termica nel pozzo di presa;
- Durata di vita dell'installazione;
- Impatto della coppia sui carichi idraulici dell'acquifero;
- Impatto della coppia sulle temperature: pennacchio termico;
- Evoluzione del pennacchio termico;
- Superamento di una soglia termica tollerata;
- Influenza della zona perturbata;
- Rigenerazione termica dell'acquifero.

# SCARICO IN ACQUE SUPERFICIALI

- Descrizione dello schema di scarico;
- Portata media e di punta, durata di funzionamento prevista;
- Temperatura dello scarico e impatto sul recettore;
- Compatibilità chimico-fisica delle acque di scarico con quelle del corso d'acqua (classe di qualità);
- Eventuale scarico nel corso d'acqua dei prodotti di trattamento dell'acqua passante negli scambiatori nel corso d'acqua
- Portata media del corso d'acqua

*- Tab. 3 , All. 5 alla parte Terza del D.Lgs. 152/06: variazione di temperatura al massimo di 3 °C tra monte e valle dello scarico nel corpo idrico*

*- Valori da definire nel Piano di Tutela regionale*

## **SCARICO IN FOGNATURA BIANCA O MISTA**

- Descrizione dello schema di scarico;
- Portata media e di punta, durata di funzionamento prevista;
- Temperatura dello scarico e impatto sul recettore;
- Natura e caratteristiche della rete (separazione tra acque bianche e acque nere);
- Dimensionamento e adattamento della rete meteorica allo scarico
- Smaltimento supplementare, in particolare durante eventi critici;
- Accordo con l'ente gestore per l'accettabilità del carico idraulico.

# ATTREZZATURA DELLE CAPTAZIONI

- Pozzo: dotato di cementazione e tratto filtrante
- Pompa sommersa: per portate in superficie l'acqua e talvolta si inseriscono nel pozzo due pompe per disporre di più regimi di prelievo idrico
- Variatore di velocità: è talora presente per modulare la portata di pompaggio in funzione della domanda
- Tubazione di collettamento: per il trasporto delle acque allo scambiatore di calore
- Filtro: posto in testa al pozzo per minimizzare la presenza di particelle fini
- Dispositivo di trattamento dell'acqua: talvolta presente per evitare difficoltà di sfruttamento legate a corrosione, precipitazione o proliferazione di batteri. In acquiferi strategici l'uso dei prodotti di trattamento deve essere effettuata con autorizzazione delle Autorità pubbliche. Il trattamento può essere effettuato nel pozzo mediante un dispositivo specifico o mediante iniezioni periodiche.
- Contatore volumetrico: per la misura dei quantitativi emunti
- Sonde di temperatura, pressione e livello piezometrico: installate sulla testa pozzo
- Dispositivi di controllo sul circuito: manometri (a monte e a valle del filtro) a monte e a valle dello scambiatore, in testa al pozzo di reiniezione
- Tubazione di scarico: dopo lo scambio termico verso un punto di scarico

# SOSTENIBILITA' SFRUTTAMENTO DELLE RISORSE GEOTERMICHE A BASSA ENTALPIA

## SONDE GEOTERMICHE (sistema a ciclo chiuso)

- Utenze di piccola dimensione (a meno di realizzare un campo di sonde per grandi utenze)
- Piccola area da dedicare all'opera
- Relativamente basso investimento iniziale
- Resa energetica contenuta
- Vincoli in fase costruttiva (modalità di realizzazione perforazioni)
- Possibili perdite di liquidi di processo nel sottosuolo
- Ridotti oneri gestionali
- Assenza di problemi di recettività delle acque allo scarico
- Durata di vita elevata (circa 50 anni)
- Contenuto tecnologico basso nello studio, realizzazione e gestione delle opere

# SOSTENIBILITA' SFRUTTAMENTO DELLE RISORSE GEOTERMICHE A BASSA ENTALPIA

(sistema a ciclo aperto)

- Utenze di medio-grande dimensione
- Area significativa da dedicare alle opere (coppia di pozzi)
- Significativo costo di investimento iniziale
- Resa energetica elevata
- Vincoli in fase costruttiva (modalità di realizzazione perforazioni)  
e di gestione (effetti idrodinamici e idrochimici nel funzionamento delle opere)
- Possibili modificazioni del chimismo delle acque nella zona interessata  
dal pennacchio termico
- Significativi oneri gestionali
- Esigenza di definire la recettività delle acque allo scarico
- Contenuto tecnologico elevato nello studio, realizzazione e gestione delle opere

PRO	CONTRO
<p><b>Sostenibilità ambientale:</b> nessuna emissione diretta in atmosfera (né CO<sub>2</sub> né altri inquinanti). Riduzione delle emissioni globali rispetto ai combustibili fossili.</p>	<p><b>Costo iniziale di investimento:</b> perforazione e installazione degli scambiatori geotermici o dei pozzi. Inoltre, a parità di potenza una pompa di calore è più cara di una caldaia.</p>
<p><b>Alta efficienza (riscaldamento):</b> anche se buona parte dell'energia elettrica è tutt'ora prodotta con combustibili fossili, le pompe di calore permettono di utilizzare l'energia primaria in modo più efficiente rispetto ai combustibili fossili.</p>	<p><b>Costi di progettazione:</b> a differenza dei sistemi classici di riscaldamento/raffrescamento, le installazioni geotermiche richiedono valutazioni geologiche.</p>
<p><b>Alta efficienza (raffrescamento):</b> rispetto ai chiller con condensazione ad aria o evaporativi, si raggiungono valori di EER più elevati e quindi si riduce il consumo elettrico.</p>	<p><b>Limitazioni:</b> l'installazione può essere difficoltosa o impossibile in determinate condizioni logistiche (es. sito inaccessibile alla perforazione per mancanza di spazio, presenza di sottoservizi...) o in particolari condizioni geologico-geomorfologiche (es. aree di frana, presenza di rocce rigonfianti...)</p>
<p><b>Riscaldamento &amp; raffrescamento:</b> entrambi garantiti da un'unica pompa di calore. Molte pompe di calore prevedono inoltre la produzione di acqua calda sanitaria.</p>	<p><b>Interferenze reciproche:</b> impianti contigui potrebbero creare un sovrasfruttamento della risorsa geotermica, causando una minore efficienza sino a un malfunzionamento del sistema. Tale aspetto richiede una progettazione accurata, specie nel caso di grandi impianti.</p>
<p><b>No stoccaggi combustibile:</b> per le aree non metanizzate, rispetto alle caldaie a gasolio, CPL o biomasse, si evita di stoccare grandi quantità di combustibile, con conseguente occupazione di spazi e rischi di incendio e scoppio.</p>	<p><b>Scarso adattamento per vecchi edifici:</b> la presenza di terminali di riscaldamento ad alta temperatura (radiatori) può rendere impossibile l'utilizzo di pompe di calore.</p>
<p><b>Applicazioni in aree remote</b> poiché si evita il trasporto di combustibili. E' però necessaria la fornitura di elettricità.</p>	<p><b>Regolamentazione frammentaria:</b> le differenze a livello di regolamentazione locale possono rappresentare, in modo più o meno significativo, perdite di tempo e soldi per i professionisti chiamati ad ottemperare alle autorizzazioni.</p>
<p><b>Bassi costi di esercizio:</b> si consuma dal 25% al 50% in meno di elettricità rispetto ai sistemi convenzionali.</p>	<p><b>Applicazioni in alta montagna:</b> in climi molto freddi la progettazione deve essere particolarmente accurata, per il rischio di congelamento del fluido termovettore all'interno della geosonda.</p>
<p><b>Silenziosità:</b> a differenza della tipologia aerotermica, la pompa di calore geotermica può essere installata in un locale chiuso e isolato acusticamente.</p>	
<p><b>Integrazione con altre energie rinnovabili:</b> possibile accoppiamento con fotovoltaico o solare.</p>	

## ENERGIA GEOTERMICA SUPERFICIALE IN GENERALE (in comparazione con altri sistemi di riscaldamento/raffrescamento)

Regione Valle d'Aosta, 2018

PRO	CONTRO
<b>COMPARATI AI SISTEMI ORIZZONTALI:</b>	<b>COMPARATI AI SISTEMI CHIUSI ORIZZONTALI:</b>
<b>Maggiore efficienza</b> garantita dalla stabilità delle temperature trovate a 100-200 m di profondità, rispetto a quelle sfruttabili a pochi m dalla superficie.	<b>Costo iniziale d'investimento</b> dovuto alle operazioni di perforazione.
<b>Meno spazio richiesto:</b> le dimensioni di un cantiere di perforazione sono ca 10 mq.	
<b>Durata dell'impianto</b> molto alta (pari a quella dell'edificio).	
<b>COMPARATI AI CIRCUITI APERTI:</b>	<b>COMPARATI AI SISTEMI APERTI:</b>
<b>Non è necessaria la presenza di acqua sotterranea</b> (benchè quest'ultima comunque migliori l'efficienza).	<b>Costo iniziale d'investimento:</b> per impianti medio-grandi, per i circuiti chiusi è necessario un numero maggiore di scambiatori di calore rispetto ai circuiti aperti.
<b>Bassa manutenzione</b>	

## Circuito chiuso - verticale

PRO	CONTRO
<b>COMPARATI AI SISTEMI VERTICALI:</b>	<b>COMPARATI AI SISTEMI VERTICALI:</b>
<b>Minori costi:</b> non sono richieste operazioni di perforazione nel sottosuolo, solo scavi lineari limitati a ca 2 m dalla superficie.	<b>Minore efficienza:</b> le temperature nei primi m del sottosuolo (a differenza di quelle a 100-200 m di profondità) sono instabili essendo influenzate dal clima, ciò comporta una minore efficienza globale.
	<b>Più spazio richiesto:</b> richiede la disponibilità di alcune centinaia di mq di terreno su cui potere effettuare scavi sino a ca 2 m di profondità

## Circuito chiuso - orizzontale

PRO	CONTRO
<b>COMPARATI AI SISTEMI CHIUSI:</b>	<b>COMPARATI AI SISTEMI CHIUSI:</b>
<b>Maggiore efficienza:</b> 1-2 pozzi sono generalmente sufficienti anche per grossi impianti industriali.	<b>Disponibilità di acqua di falda</b> necessaria (meglio con piccola profondità della tavola d'acqua, per minimizzare i costi della pompa).
<b>Migliore prestazione termica</b> della pompa di calore.	<b>Maggiori costi di esercizio</b> legati al funzionamento della pompa nel pozzo (specie con alte profondità della tavola d'acqua).
<b>Minori costi di perforazione</b>	<p><b>Restituzione dell'acqua emunta:</b> l'acqua estratta dal pozzo deve essere reimpressa nell'acquifero (mediante un apposito pozzo di reimmissione) oppure scaricata nel reticolo idrografico superficiale (o in fognatura). Ciò comporta:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Solitamente procedure autorizzative più o meno complesse, sia per l'estrazione che per la restituzione</li> <li>2. L'acqua sotterranea reimpressa ha una temperatura diversa (solitamente di più o meno 3°-4°C, a seconda che si stia operando in modalità raffreddamento o riscaldamento) rispetto alla temperatura originale dell'acquifero. Sono quindi necessarie valutazioni ambientali preliminari</li> <li>3. Per evitare problemi di interferenza tra i pozzi di estrazione e reimmissione, è necessario uno spazio sufficiente tra di essi</li> <li>4. In alcune condizioni idrogeologiche il pozzo di reimmissione può essere soggetto a occlusione dei filtri</li> </ol>

## Circuito aperto

<b>Gestione “libera”</b>	<b>Gestione “controllata”</b>
Maggiore elasticità nelle autorizzazione	Maggiore controllo nelle autorizzazioni
Implementazione rapida delle opere	Lentezza nella messa in opera delle realizzazioni
Responsabilità operatori	Responsabilità degli operatori e delle Autorità pubbliche
Possibile scarsa qualità del manufatto	Maggiore qualità nella realizzazione del manufatto
Problemi ambientali talora incontrollabili: (messa in comunicazione falde, dispersione inquinanti nel sottosuolo, riduzione efficienza per intasamento chimico-fisico-batterologico, etc., incremento dell'inquinamento diffuso)	Problemi ambientali minimizzabili e maggiormente controllabili

**Bilancio nei due approcci e applicazione in relazione a criteri di priorità basati sulle condizioni ambientali del sito e l'importanza delle opere previste**

**Minore valore di emissioni di CO<sub>2</sub> fra tutte le tecnologie disponibili per la climatizzazione e più basso impatto ambientale complessivo**